

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2020

Bc. Nikol Vinklerová

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Dynamická stabilita VN sítě na vrtné lodi
Dynamic stability of drillship's MV power system

2020

Bc. Nikol Vinklerová

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Nikol Vinklerová

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

Dynamická stabilita VN sítě na vrtné lodi
Dynamic stability of drillship's MV power system

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor dynamické stability (metody výpočtu)
2. Popis sítě 11kV vrtné lodi (systém chránění)
3. Modelování sítě 11kV (model regulátoru buzení, model regulátoru diesel agregátu)
4. Nastavení modelu sítě 11kV
5. Porovnání výsledků zkratu na přípojnici 11 kV při simulaci modelem se skutečnými (naměřenými) hodnotami
6. Simulace vybraných přechodových jevů na modelu
7. Závěr – zhodnocení výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:


Z. Trojánek, J. Hájek, P. Kvasnica – Přechodné jevy v elektrizačních soustavách, SNTL/ALFA 1987
IEEE Std 421.5™-2016 - IEEE Recommended practice for excitation system models for power system stability studies
Kolektiv autorů - Řízení a stabilita elektrizační soustavy, [Praha]: Asociace energetických manažerů, 2013

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry





prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně. Uvedla jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.

V Ostravě dne: 28. dubna 2020


.....
podpis studenta

Poděkování

Ráda bych touto cestou vyjádřila poděkování vedoucímu této práce prof. Ing. Stanislavu Ruskovi, CSc. za jeho cenné rady a doporučení. Taktéž bych chtěla poděkovat externímu odborníkovi z firmy ABB, s.r.o Ing. Martinu Reimerovi, Ph.D. za vstřícnost, ochotu a odbornou pomoc při získání potřebných informací a podkladů. Ráda bych zde poděkovala i své rodině, která mě po celou dobu studia i vypracování této práce podporovala.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá dynamickou stabilitou VN sítě vrtné lodi. Jsou zde vysvětleny nezbytné teoretické podklady potřebné pro analýzu této stability, základní vlastnosti lodních distribučních sítí, včetně jejich ochrany a způsobu řízení. Praktická část se věnuje modelování sítě v programu Digsilent Power factory 2018 včetně nastavení potřebných regulátorů synchronního stroje. Následná simulace obsahuje 4 druhy možných přechodných dějů, které mohou v síti nastat (třífázový souměrný zkrat, náhle odpojení generátoru a skokové zvýšení a snížení zátěže). Simulace jsou vyhodnoceny pomocí grafů.

Klíčová slova

Průmyslová síť, dynamická stabilita, regulátor buzení, regulátor primárního pohonu, simulace, přechodné jevy

Abstract

This thesis consults the dynamic stability of an MV drilling ship distribution power system. The main theoretical topics needed for stability analysis are explained as the basic functionality of a ship's distribution power system, including protection scheme and system operations. The practical part is realized by using software Digsilent Power Factory 2018 for network creation with necessary settings of the automatic voltage regulator and governor of synchronous machine. The simulation contains 4 examples of transient events, which may happen (symmetrical 3 phase short circuit, sudden loss of generation, and sudden increase and decrease of load). Simulations are evaluated by graphical representation.

Key Words

Industrial network, dynamic stability, automatic voltage regulator, governor regulator, simulation, transient studies

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	8
Seznam ilustrací.....	9
Seznam tabulek.....	11
Úvod.....	12
1. Dynamická stabilita.....	13
1.1 Úvod	13
1.2 Úhlová stabilita přechodná.....	14
1.3 Frekvenční stabilita.....	16
1.4 Metody výpočtu dynamické stability.....	18
1.4.1 Výpočet chodu sítě.....	18
1.5 Gauss-Seidlova iterační metoda	19
1.6 Newton – Rhapsanova iterační metoda	19
1.6.1 Obecné řešení	19
1.6.2 Výpočet pro n rovnic o n neznámých	20
2. Synchronní stroje a budicí systémy.....	21
2.1 Synchronní stroj	21
2.2 Teoretický rozbor budících systémů synchronních strojů.....	22
2.3 Teoretický rozbor modelu budicího systému synchronního stroje.....	23
2.3.1 Statický budič nezávislý s neřízeným diodovým můstkem.....	23
2.4 Teoretický rozbor primárního pohonu.....	24
2.4.1 Vznětový motor s přepínáním.....	24
3. Popis distribuční sítě 11 kV vrtné lodi	25
3.1 Distribuce elektrické energie.....	25
3.2 Obecná charakteristika vrtné lodi	25
3.3 Analyzovaná síť 11 KV	26
3.3.1 11 kV Rozvaděč UniGear ZS1	27
3.4 Systém chránění	28
3.4.1 Ochrany generátoru.....	29
4. Modelování 11 kV sítě	31
4.1 Úvod k programu Digsilent Power Factory 2018.....	31
4.2 Vstupní parametry modelů.....	32

4.2.1	Diesel generátory	32
4.2.2	Transformátory	33
4.2.3	Model zátěže.....	34
4.2.4	Model kabelového vedení	34
4.3	Nastavení modelu regulátoru buzení a pohonu	35
4.3.1	Regulátor buzení UNITROL 1000.....	35
4.3.2	Model regulátoru buzení AC7B.....	36
4.3.3	Výpočet parametrů regulátoru buzení	37
4.3.4	Model pohonu DEGOV1.....	39
4.3.5	Skoková odezva soustavy.....	40
5.	Ověření modelu s průběhy veličin z reálného měření	42
5.1.1	Simulace zkratu v Digsilentu.....	42
5.1.2	Porovnání výsledku s naměřenými hodnotami.....	43
5.1.3	Další výsledky simulace přechodného děje.....	44
6.	Simulace dalších přechodných dějů	47
6.1	Náhlé odpojení generátoru	47
6.2	Náhlé zvýšení a snížení zátěže	50
	Závěr	54
	Literatura	55
	Seznam příloh.....	56

Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratka	Jednotka	Význam
P_m	(W)	Výkon turbíny
P_e	(W)	Elektrický výkon generátoru
P	(W)	Činný Výkon
S	(VA)	Zdánlivý výkon
Q	(var)	Jalový výkon
U	(V)	Napětí
I	(A)	Proud
f	(Hz)	Frekvence
X	(Ω)	Impedance
R	(Ω)	Odpor
t	(s)	Čas
C_0	(F)	Elektrická kapacita
I_0	(A)	Nulový proud
n	(rpm)	Otáčky
$L1$	(-)	Fáze 1
$L2$	(-)	Fáze 2
$L3$	(-)	Fáze 3
AC	(-)	Střídavý proud
DC	(-)	Stejnoseměrný proud
PT	(-)	Měřicí napěťový transformátor
CT	(-)	Měřicí proudový transformátor
p.u.	(-)	Per unit
nn	(-)	Nízké napětí
vn	(-)	Vysoké napětí
IT	(-)	Izolovaná síť
AVR	(-)	Regulator buzení
GOV	(-)	Regulátor primárního pohonu
PID	(-)	PID regulator
PSS	(-)	Výkonový systémový stabilizátor
ABS	(-)	American Bureau of Shipping
REG615	(-)	Generator protection and control
REG630	(-)	Generator protection and control
REM615	(-)	Motor protection and control
DGMS	(-)	Diesel Generator Management System
PMS	(-)	Power Management System
RMS	(-)	Root-mean-square
ANSI	(-)	American National Standard Institute

Seznam ilustrací

Obrázek 1.1 Rozdělení dynamické stability (1)	13
Obrázek 1.2 Jednopolové schéma	14
Obrázek 1.3 Náhradní schéma.....	14
Obrázek 1.4 Výkonová charakteristika (1)	15
Obrázek 1.5 Stabilní a nestabilní přechod (1)	15
Obrázek 1.6 Jednopolové schéma se zkratem na jednom z paralelních vedení	16
Obrázek 1.7 Výkonové charakteristiky při zkratu (1)	16
Obrázek 1.8 Vyjádření uzlové admitanční rovnice	17
Obrázek 1.9 Uzel soustavy.....	18
Obrázek 2.1 a) Princip činnosti synchronního stroje b) Indukované napětí.....	21
Obrázek 2.2 Budicí systémy synchronních strojů (1).....	22
Obrázek 2.3 Statický budič nezávislý s neřízeným diodovým můstkem.....	23
Obrázek 2.4 Model STA1A	23
Obrázek 2.5 Schéma vznětového motoru (1)	24
Obrázek 2.6 Schéma modelu vznětového motoru (1).....	24
Obrázek 3.1 Seadrill loď (7)	25
Obrázek 3.2 Rozvaděč PORT	26
Obrázek 3.3 Zemnicí soustava (10).....	28
Obrázek 4.1 Prostředí programu Digsilent Power Factory 2018.....	31
Obrázek 4.2 Náhradní schémata model synchronního stroje v Digsilentu (13).	32
Obrázek 4.3 Přehledové schéma bloku generátoru v prostředí Digsilent.	33
Obrázek 4.4 Model sítě.....	34
Obrázek 5.1 Přehledové schéma bezkartáčového budicího systému (15).....	35
Obrázek 5.2 3fázové schéma bezkartáčového budicího systému (16).....	35
Obrázek 5.3 Model regulátoru buzení AC7B.....	36
Obrázek 5.4 Model pohonu DEGOV1.....	39
Obrázek 5.5 AVR test.....	40
Obrázek 5.6 PCU test	41
Obrázek 5.7 Stav sítě po proběhnutí simulace	43
Obrázek 5.8 Srovnávací charakteristika z reálného měření	43
Obrázek 5.9 Charakteristika napětí na rozvaděči STBD simulovaného modelu.....	44
Obrázek 5.10 Červená křivka – výkon generátoru, zelená křivka – mechanický moment turbíny	45
Obrázek 5.11 Horní graf – frekvence na rozvaděči STBD, spodní graf – otáčky generátoru G2	45
Obrázek 6.1 Stav sítě po odpojení generátoru.....	47
Obrázek 6.2 Průběh napětí generátoru G2 po odpojení generátoru G1.	48
Obrázek 6.3 Horní graf – průběh frekvence, spodní graf – průběh otáček generátoru G2	48
Obrázek 6.4 Červená křivka – výkon generátoru, zelená křivka – mechanický moment turbíny	49
Obrázek 6.5 Nestabilní přechod po odpojení generátoru.....	49
Obrázek 6.6 Stav sítě	50
Obrázek 6.7 Průběh napětí na generátoru G2 při náhlém zvýšení zátěže	51
Obrázek 6.8 Průběh napětí na generátoru G2 při náhlém snížení zátěže	51
Obrázek 6.9 Zvýšení zátěže; horní graf – průběh frekvence, spodní graf – průběh otáček generátoru	52

Obrázek 6.10 Snížení zátěže; horní graf – průběh frekvence, spodní graf – průběh otáček generátoru	52
Obrázek 6.11 Zvýšení zátěže; červená křivka – výkon generátoru, zelená křivka – mechanický moment turbíny	53
Obrázek 6.12 Snížení zátěže; červená křivka – výkon generátoru, zelená křivka – mechanický moment turbíny	53

Seznam tabulek

Tabulka 1 Druhy rotačních budičů (5).....	22
Tabulka 2 Druhy použitých polí v rozvaděči UniGear analyzované sítě (8)	27
Tabulka 3 IED Ochrany – přehled funkcí.....	28
Tabulka 4 Vstupní parametry generátorů G1, G2	32
Tabulka 5 Vstupní hodnoty typů transformátoru AFT a BOW.....	33
Tabulka 6 Vstupní data kabelových vedení	34
Tabulka 7 Vstupní hodnoty výpočtu parametrů	37
Tabulka 8 Parametry regulátoru AC7B	39
Tabulka 9 Parametry modelu	40

Úvod

Tato diplomová práce se věnuje dynamické stabilitě lodních distribučních sítí. První dvě kapitoly se zabývají základními teoretickými podklady pro studium dynamické stability elektrizačních soustav. Je zde podrobně vysvětlena úhlová stabilita přechodná, frekvenční a napěťová. Práce dále obsahuje popis metod výpočtu této stability – výpočet chodu sítě s následným popisem matematického aparátu, který se pro vyšetřování této problematiky používá (Newton – Rhapsanova iterační metoda).

Ve třetí kapitole je uvedena analýza 11 kV sítě vrtné lodi. Podobnost s touto sítí je možné nalézt v jakékoliv jiné průmyslové síti izolované od přenosové soustavy nebo klasických ostrovních režimech. Lodní vrtné distribuční sítě jsou typické svými náročnějšími požadavky pro jejich stabilitu, ochranný systém a řízení oproti jiným lodním distribučním sítím, jelikož jakákoliv závažnější porucha může ohrozit zejména drahá vrtná zařízení a jejich provoz. Tyto sítě lze považovat za měkké, jelikož jejich tvrdost je dána pouze počtem připojených generátorů. Elektrárenský blok zde tvoří generátor s diesel pohonem a potřebnými regulátory. Zátěž těchto systémů je tvořena zejména elektrickými lodními pohony napájené přes frekvenční měniče a vrtná zařízení. Distribuční síť je obvykle provozována jako radiální, avšak při poruše je schopna přecházet na topologii okružní tak, aby došlo k udržení nezbytných zařízení v provozu, přerozdělení výkonových toků a odizolování poruchové sekce.

Praktickou částí práce je modelování a simulace vybraných přechodných dějů 11 kV vn sítě v programu Digsilent Power Factory 2018. Kromě sestavení modelů sítě se základními prvky, je zde popsán dynamický model regulátoru buzení AVR a regulátoru primárního pohonu (diesel pohonu) pro synchronní stroj, včetně popisu nastavení jejich parametrů. Model sítě obsahuje dva generátory, tři rozvaděče a zátěž v podobě ekvivalentních asynchronních motorů a pasivních zátěží.

Pro ověření nastavení parametrů a typů modelů regulátorů je zde simulována závažná porucha v podobě třífázového symetrického zkratu na jednom z rozvaděčů a následné srovnání s naměřenými daty na analyzované vn síti 11 kV.

Další simulace reprezentují přechodné děje v podobě náhlého odpojení generátoru a skokové snížení a zvýšení zátěže.

1. Dynamická stabilita

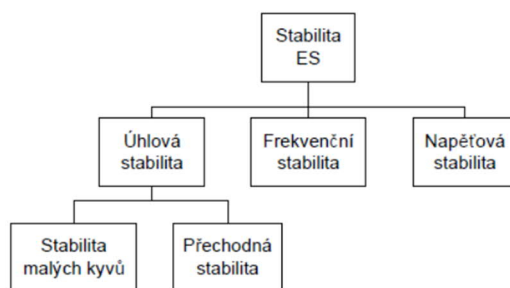
V této kapitole bude popsán potřebný teoretický základ pro studium dynamické stability.

1.1 Úvod

Stabilita soustavy vyznačuje schopnost soustavy se udržet ve rovnovážném stavu po odeznění elektromagnetických dějů, které vznikly v důsledku určitého rozruchu. Rovnovážným stavem je myšlen stav, kdy se obnoví stav původní, nebo vznikne stav nový. Za rozruch lze považovat:

- Odebírání/dodávání výkon, změny topologie sítě,
- poruchy na zařízení (stárnutí, skryté vady),
- poruchy vlivem klimatu,
- poruchy způsobené člověkem.

Vzhledem k tomu, že samotná soustava je velmi složitý systém, rozděluje se na několik dílčích typů stability a je nutné pochopit vazby mezi nimi. Soustava se považuje za nelineární systém, z důvodu neustále se měnících podmínek. (1)



Obrázek 1.1 Rozdělení dynamické stability (1)

Úhlová stabilita

Týká se především elektromechanických dějů. Popisuje schopnost synchronních strojů zůstat po určitém rozruchu v synchronním chodu se zbytkem soustavy. Základním posuzovacím parametrem je schopnost udržet rovnováhu mezi elektrickým momentem generátoru a mechanickým momentem poháněcího stroje (v tomto případě diesel agregátem).

Dělíme ji na stabilitu malých kyvů a přechodnou (tzv. transient). Rozdílem mezi nimi, je použití prostředků k jejich analýze.

Stabilitu malých kyvů považujeme za lineární soustavu a využíváme řešení soustav diferenciálních rovnic. Výsledkem jsou kořeny charakteristických rovnic.

Přechodnou stabilitu nepovažujeme za lineární, tudíž nemá žádné analytické řešení. K řešení využíváme simulátorů (např. Digsilent Power Factory). Tyto simulátory řeší problém v časové oblasti a jejich výsledkem jsou průběhy zkoumaných veličin v reakci na změnu vstupních podmínek. Tento typ stability bude podrobněji popsán v kapitole 1.2. (1)

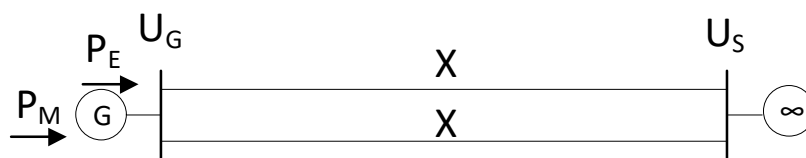
Frekvenční stabilita a napět'ová stabilita

Frekvenční stabilita zohledňuje schopnost soustavy udržet si rovnováhu mezi činným výkonem zdrojů a spotřebiči. To znamená, schopnost zdroje udržet otáčky co nejblíže jmenovité hodnotě. Změnou může být například výpadek jednoho zdroje nebo změna v odebíraném výkonu (výpadek motoru). Tyto změny vyvolají ráz činného výkonu, který si přerozdělí ostatní generátory po ustálení regulačního děje. Napět'ová stabilita vyjadřuje schopnost soustavy přenést výkon při daném napětí. Dělíme ji na statickou a dynamickou. (1)

V následujících kapitolách bude podrobně popsána pouze úhlová stabilita přechodná a frekvenční.

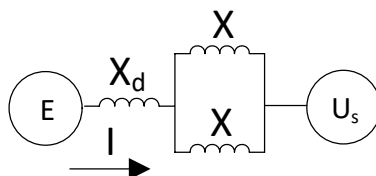
1.2 Úhlová stabilita přechodná

Tato stabilita bude vysvětlena na jednostrojovém modelu na Obrázek 1.1. Tento model obsahuje synchronní generátor poháněný parní turbínou, který dodává elektrický výkon do tvrdé sítě přes dvojité vedení o reaktanci X . (1)



Obrázek 1.2 Jednopolové schéma

Výchozím stavem je předpoklad, že výkon turbíny (P_M) se rovná elektrickému výkonu generátoru (P_E), pro zjednodušení jsou ztráty mechanické a elektrické zanedbány.



Obrázek 1.3 Náhradní schéma

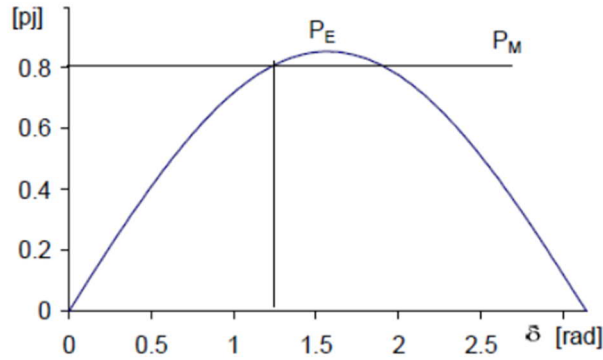
Pro vytvoření náhradního schématu je synchronní generátor nahrazen elektromotorickým napětím E a přechodnou reaktancí X_d . Pro činný dodávaný výkon platí:

$$P_E = \frac{E \cdot U_S}{X_\Sigma} * \sin(\delta), \quad (1.1)$$

kde U_S je napětí tvrdé sítě, X_Σ je sumární reaktance a zátěžný úhel δ , je úhel, který svírají fázory E a U_s . (1)

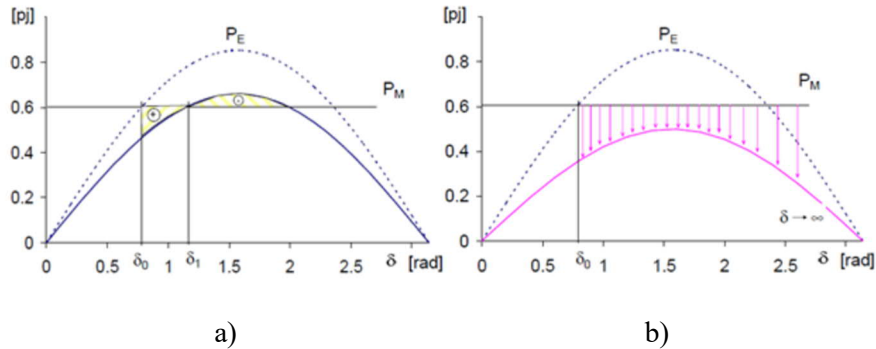
Výkonová charakteristika popisuje vztah mezi činným výkonem generátoru a zátěžným úhlem. Na ose x je vynesena poměrná hodnota vztažená na jmenovitý zdánlivý výkon generátoru, na ose y je zobrazen zátěžný úhel v radiánech. Má tvar sinusovky. Na charakteristice je vynesena hodnota mechanického výkonu ve tvaru přímky. Průsečík sinusovky a přímky P_M popisuje stabilní pracovní bod.

Pokud je vedení mezi generátorem a sítí dlouhé je amplituda sinusovky malá v porovnání s velikostí přímky P_M . (1)



Obrázek 1.4 Výkonová charakteristika (1)

Pro vytvoření přechodného děje, bude vytvořen rozruch pomocí výpadku jednoho paralelního vedení. Stabilita zde závisí na poměru mezi reaktancí vedení ku synchronní reaktanci stroje. Pokud bude dostatečná malá, přechodný děj bude stabilní viz. obrázek 5a, za vytvoření nové výkonové charakteristiky skokem (původní je zobrazena tečkovanou čarou), druhý nestabilní případ je zobrazen na obrázku 5b, kdy nedošlo k udržení stability stroje, jelikož výkonová charakteristika klesla pod přímku P_M a stroj přechází do asynchronního chodu.



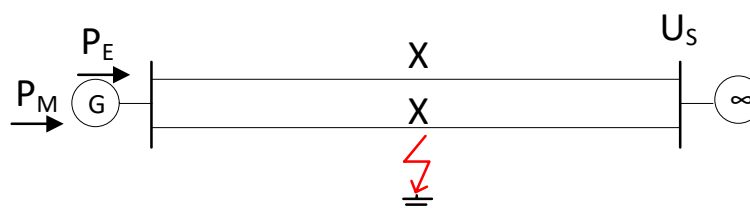
Obrázek 1.5 Stabilní a nestabilní přechod (1)

Dochází ke změně zátěžného úhlu podle rovnice:

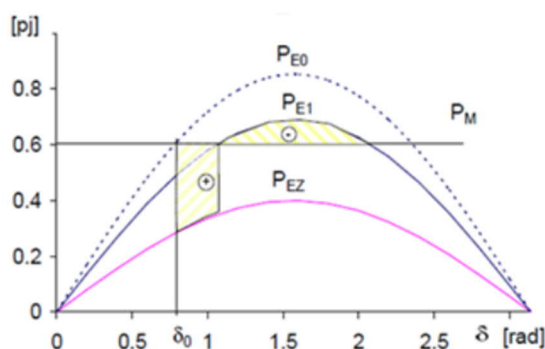
$$\frac{T_M}{\omega_{MS}} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = M_M - M_E \approx P_M - P_E, \quad (1.2)$$

kde T_M je mechanická časová konstanta a ω_{MS} synchronní úhlová rychlost. V rovnici jsou nahrazeny momenty výkonů. Při výpadku vedení se změní výkon P_E (zmenší se) oproti výkonu P_M , dochází ke zvětšení zátěžného úhlu a rotor stroje se urychluje, rovnováha mezi výkony nastává v bodě δ_1 . Na obrázku jsou vyznačeny dvě plochy. Akcelerační plocha se znaménkem + reprezentuje kinetickou energii, kterou rotor získal při přechodu z δ_0 do δ_1 . Brzdící plocha se znaménkem -, která reprezentuje zpomalení rotoru, musí být větší nebo rovna velikosti akcelerační plochy, aby byl přechod stabilní (tzv. metoda ploch). (1)

Druhý příkladem složitějšího elektromagnetického děje je zkrat na jednom z jeho vedení a jeho následné odpojení.



Obrázek 1.6 Jednopolové schéma se zkratem na jednom z paralelních vedení



Obrázek 1.7 Výkonové charakteristiky při zkratu (1)

Na obrázku 7 jsou reprezentovány výkonové charakteristiky, kdy P_{E0} je charakteristika původní, P_{EZ} při zkratu a nová P_{E1} po vypnutí zkratu. Žlutá plocha opět odpovídá kinetické energii rotoru (rozdíl mezi P_M a P_E), kromě této energie zde hraje i roli délka trvání zkratu. Z tohoto důvodu musí ochrany zkrat včas rozpoznat a reagovat vypnutím. Mezní doba trvání zkratu, je čas, za který je nutné odpojit zkrat, jinak dojde ke ztrátě stability (je to čas, při kterém se akcelerační plocha rovná ploše brzdící). V praxi nelze metodu ploch, vzhledem k složitosti uplatňovat, a proto je využíváno výpočetních programů (např. program MODES, Power Factory Digsilent). (1)

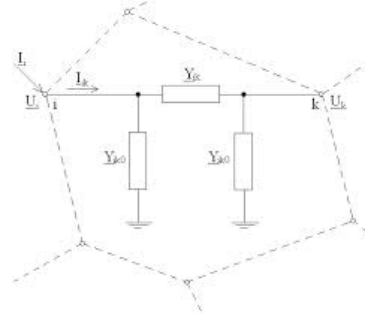
1.3 Frekvenční stabilita

Jak již bylo zmíněno v úvodní kapitole, frekvenční stabilita se zabývá schopností soustavy udržet otáčky (frekvenci) zdroje blízko jmenovité hodnoty, například při výpadku jiného synchronně pracujícího stroje. Pro popis této stability je využito teorie z kap. 2.1.

Maticový zápis každého uzlu sítě (pro popis napět'ových a proudových poměrů) nám vyjadřuje uzlová admitanční rovnice:

$$\sqrt{3}\underline{I} = \underline{A} * \underline{U}, \quad (1.3)$$

$$\underline{U} = \sqrt{3}\underline{Z} * \underline{I}. \quad (1.4)$$



Obrázek 1.8 Vyjádření uzlové admitanční rovnice

Zkratová admitanční rovnice:

$$\sqrt{3}\underline{I}_{ZK} = \underline{Y}_K * \underline{U}, \quad (1.5)$$

kde levá strana obsahuje vektor zkratových proudů, dodávaných generátory či motory při zkratu do uzlu a na pravé straně byla zaměněna síťová matice \underline{A} , za zkratovou admitanční matici \underline{Y}_K , která počítá i s diagonálními prvky zvětšené o hodnoty admitancí zátěží a generátoru připojených do uzlu. (1)

Přechodný děj pro popis frekvenční stability, bude reprezentován výpadkem zdroje v uzlu, a tím skokovou změnou vstřikovaného proudu I_{Gi} . Maticová rovnice bude mít tvar:

$$\sqrt{3} \begin{pmatrix} 0 \\ \Delta I_{Gi} \\ 0 \end{pmatrix} = \underline{Y}_K \Delta \underline{U}, \quad (1.6)$$

kde levá strana obsahuje sloupcový vektor o jednom prvku, který vyjadřuje změnu proudu, pravá přírůstek napětí ve všech uzlech, který byl způsoben změnou proudu v i-tém uzlu. Pro fázové napětí v k-tém uzlu (po úpravách) můžeme psát:

$$\Delta \underline{U}_k = \sqrt{3}\underline{Z}_{ik}\Delta \underline{I}_{Gi}, \quad (1.7)$$

kde \underline{Z}_{ik} je prvek zkratové imedanční matice určující el. vzdálenost uzlů i a k. Změna fázového napětí vyvolá změnu proudu, a tudíž i změnu činného výkonu generátoru v k-tém uzlu. Tento výkon lze vyjádřit vztahem $\Delta P_k = 3X_{ik}Y_{Gk}Re\{E_k\Delta I_{Gi}\}$. Tato rovnice vyjadřuje elektrické rozdělení rázu činného výkonu, jinými slovy, že výpadek výkonu se rozdělí mezi ostatní stroje od místa výpadku v poměru elektrických vzdáleností. Změna činného výkonu se projeví změnou otáček turbín, a tím i celosystémovou změnou frekvence. Na tyto výchylky reagují primární regulační děje (primární regulátory). (1)

1.4 Metody výpočtu dynamické stability

1.4.1 Výpočet chodu sítě

Výpočtu chodu sítě (tzv. power flow/load flow) využíváme jako základní analýzu pro pochopení soustavy v daném režimu. Při tomto výpočtu zjišťujeme napěťové a výkonové poměry, celkové činné a jalové ztráty v soustavě, výkonové toky a ztráty. Výsledkem je pak obraz ustáleného stavu, který je možno využít pro další analýzy.

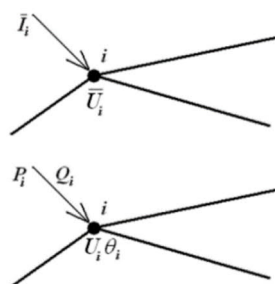
Předpoklad výpočtu:

- řešení ustáleného stavu,
- proudy a napětí mají sinusový průběh – rozdělení na aktivní ($\underline{U}, \underline{I}, \underline{S}$) a pasivní veličiny ($\underline{Y}, \underline{Z}$),
- třífázové sítě jsou symetrické – výpočet pouze pro jednu fázi, zbytek se pootočí o $\pm 120^\circ$,
- konstantní síťové prvky provozované při jmenovité frekvenci (lineární impedance).

Využíváme metod smyčkových proudů a uzlových napětí pro matematický popis společně s platností Ohmova a Kirchhoffových zákonů. Metoda uzlových napětí je výhodnější – jednodušší příprava vstupních dat a uzlových rovnic.

Pro výpočet je nutné si definovat uzly i sítě. Tyto uzly reprezentují rozvodnu, odběrové místo, generátor apod. Jsou určeny 4 aktivními veličinami. Celkový výkon do uzlu je buď dodávaný (+) nebo odebíraný (-). Dělíme je na 3 typy (vždy známe dvě aktivní veličiny, zbytek se dopočítává):

- PQ (odběrový uzel) – známe P a Q
- PU (elektrárenský, napěťově řízený) – známe P a U
- Referenční/bilanční uzel (tzv. slack, swing, infinite) – známe U a Θ



vzájemný vztah:
$$\underline{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\sqrt{3}\underline{U}_i} \quad (1.8)$$

Obrázek 1.9 Uzel soustavy

Dále je pro výpočet nezbytné znát topologii sítě společně s charakteristikou jednotlivých síťových prvků (admittance/impedance), maximální zatížení prvků a další. Pro uzly je potřeba identifikovat počáteční podmínky.

Pro řešení výpočtu chodu sítě používáme numerické metody, kdy na počátku odhadneme řešení (vstup do algoritmu metody). V iteraci (jeden algoritmus metody) nalezneme nový odhad, který by se měl přibližovat výslednému řešení. Iterace opakujeme, přičemž nově vypočtená vždy nahrazuje původní vstup, dokud nenastane konvergence (ustálení číselného řešení). Využíváme dvě numerické metody – Gauss-Seidlovu a Newton-Raphsonovu. Druhá jmenovaná metoda se dělí na zjednodušenou Fast-Decoupled a DC load flow metodu. (1) (2)

1.5 Gauss-Seidlova iterační metoda

Tato metoda se používá pro řešení malých sítí (do 50 uzlů). Její výhoda spočívá v jednoduchosti matematického modelu a dále ve spolehlivosti (jednotlivé iterace mají menší odchylky, a tudíž je pomalá). Nevýhodou je použití pro složitější systémy, kde se prodlužuje doba výpočtu.

Tuto metodu se dnes téměř nevyužívá, spíše pro výukové účely. (2)

1.6 Newton – Rhapsanova iterační metoda

Nejpoužívanější metoda. Rychle konverguje a počet iterací nezávisí na velikosti sítě. Její nevýhoda spočívá v náročnosti na paměť počítače (složitý výpočet kořenů) a možnost konvergování ke špatnému výsledku. (2)

1.6.1 Obecné řešení

N-R metoda převádí nelineární rovnice typu $f(x)=0$ na lineární řešení za využití tečen. Aby soustava měla řešení, je nutno znát derivaci funkce $f'(x)$. V každém výpočtovém bodě je pak provedena linearizace pomocí Taylorova rozvoje. (3) (2) (1)

Nelineární rovnice soustavy

$$f(x) = y \quad (1.9)$$

Počáteční odhad $x^{(0)}$, odchylka od správného řešení $\Delta x^{(0)}$

$$f(x^{(0)} + \Delta x^{(0)}) = y \quad (1.10)$$

Taylorův rozvoj

$$f(x^{(0)} + \left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)} * \Delta x^{(0)} + \frac{1}{2!} \left(\frac{d^2f}{dx^2}\right)^{(0)} * (\Delta x^{(0)})^2 + \dots = y \quad (1.11)$$

Pomocí prvních dvou řádů Taylorova rozvoje provedeme linearizaci, vyšší zanedbáváme

$$\Delta y^{(0)} \approx \left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)} * \Delta x^{(0)}, \text{ kde } \Delta y^{(0)} \text{ je defekt a vyjádřen je } \Delta y^{(0)} = c - f(x^{(0)}) \quad (1.12)$$

Druhá aproximace odhadu

$$x^{(1)} = x^{(0)} + \frac{\Delta y^{(0)}}{\left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)}} \quad (1.13)$$

1.6.2 Výpočet pro n rovnic o n neznámých

Soustava nelineárních rovnic

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = y_1 \quad (1.14)$$

$$f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = y_2 \quad (1.15)$$

$$f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = y_n \quad (1.16)$$

Odhad kořenů v nulté iteraci $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$. Tyto kořeny se budou od přesné hodnoty lišit o Δx_i . S využitím Taylorova rozvoje vznikne

$$f_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(0)} * \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^{(0)} * \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^{(0)} * \Delta x_n^{(0)} = y_1 \quad (1.17)$$

$$f_2^{(0)} + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^{(0)} * \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^{(0)} * \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)^{(0)} * \Delta x_n^{(0)} = y_2 \quad (1.18)$$

$$f_n^{(0)} + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^{(0)} * \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)^{(0)} * \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^{(0)} * \Delta x_n^{(0)} = y_n \quad (1.19)$$

A v maticovém tvaru

$$\begin{pmatrix} y_1 - f_1^{(0)} \\ y_2 - f_2^{(0)} \\ \vdots \\ y_n - f_n^{(0)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^{(0)} \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)^{(0)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^{(0)} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{pmatrix} \quad (1.20)$$

Zkráceně

$$(\Delta Y^{(0)}) = (J^{(0)}) * (\Delta X^{(0)}), \text{ kde } J \text{ se nazývá Jacobiho matice.} \quad (1.21)$$

Algoritmus N-R metody, který vyplývá z výše popsaného odvození, je následující:

- Načtení vstupních hodnot, nastavení počátečních hodnot stavových veličin.
- Dosazení do soustavy rovnic a výpočet defektu v první iteraci.
- Pokud je defekt menší nebo roven toleranci konečných hodnot, konec výpočtu.
- Pokud není, proběhne výpočet Jacobiho matice.
- Určí se korekce $\Delta X^{(k)}$.
- Nový výpočet vstupních hodnot pro výpočet defektu.
- Zopakování procesu. (3) (1) (2)

2. Synchronní stroje a budicí systémy

V této kapitole bude popsán základní princip synchronního stroje a budicích systému. Tento podklad je nezbytný pro následnou praktickou část práce.

2.1 Synchronní stroj

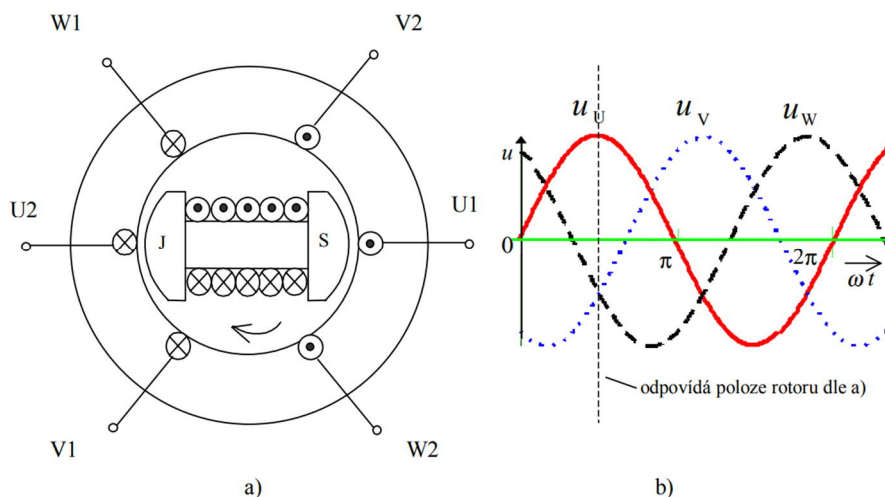
Synchronní stroj je druh elektrického točivého stroje. Jeho využití je především ve smyslu generátoru s určitým typem primárního pohonu. Další využití těchto strojů je motor nebo synchronní kompenzátor.

Konstrukce

Synchronní stroj se stejně jako asynchronní skládá z rotoru a statoru. Stator obsahuje 3fázové vinutí (U, V, W) vzájemně pootočené o 120° , umístěné v drážkách. Na rotorovém vinutí je umístěno budicí vinutí, které je napájeno ss proudem přes sběrací kroužky a kartáče. Existují dva základní typy – synchronní stroje s vyniklými póly, nebo stroje s hladkým rotorem. Dalším typem je synchronní stroj s permanentními magnety.

Princip činnosti

Pokud poháněcí ústrojí začne roztáčet rotor a zároveň jeho budicím vinutím prochází stejnosměrný proud, začne vznikat první točivé magnetické pole n . Toto pole indukuje ve statorovém vinutí trojfázové střídavé napětí. Při připojení zátěže na svorky statoru (kotvy), bude statorem procházet trojfázový střídavý proud. Tento proud je vyvolán druhým točivým magnetickým polem n_{sl} . Obě tato magnetická pole mají stejnou rychlost otáčení $n = n_{sl}$. (4) (1)

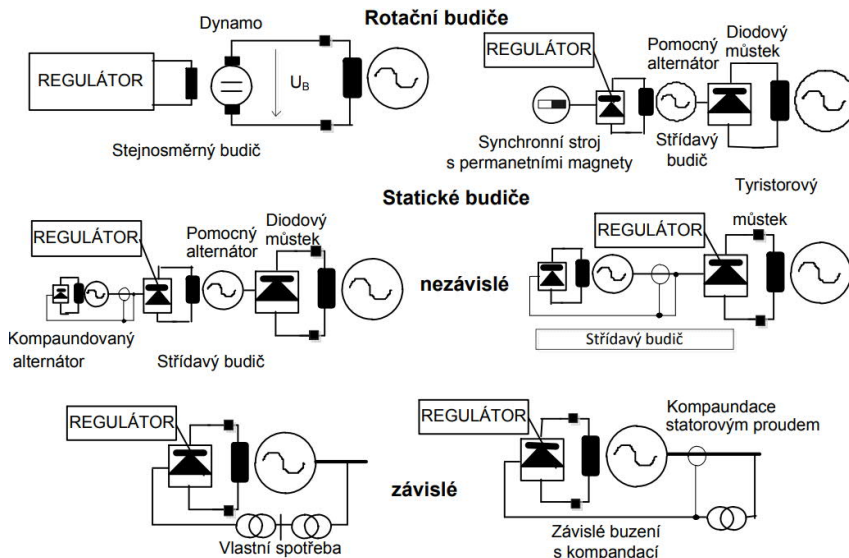


Obrázek 2.1 a) Princip činnosti synchronního stroje b) Indukované napětí

Požadavkem na svorkové napětí generátoru je ho i se změnou zatížení udržovat konstantní. Toto napětí lze regulovat změnou budicího proudu (za pomoci budicího systému). Při zvětšení zatížení generátoru dochází k poklesu napětí, a proto je nutné zvyšovat budicí proud, při zmenšení naopak. (4)

2.2 Teoretický rozbor budících systémů synchronních strojů

Budicí proud synchronního stroje je dodáván a regulován z budicího systému. Tento systém je tvořen dvěma základními prvky – budičem a regulátorem, včetně ochran.



Obrázek 2.2 Budicí systémy synchronních strojů (1)

Budicí vinutí, připojena na rotor, jsou napájeny stejnosměrným proudem z řízeného zdroje. Systémy jsou závislé, nebo nezávislé. Rozdíl mezi nimi závisí na tom, jestliže zdroj budicího proudu je připojen do sítě, do které pracuje samotný synchronní stroj. (5)

Druhy budičů

- 1) **Rotační budiče** – točivé stroje, které odebírají mechanickou energii z hřídele.
- 2) **Statické budiče** – mechanická energie je dodávána z jednoho nebo více statických zdrojů.

Tabulka 1 Druhy rotačních budičů (5)

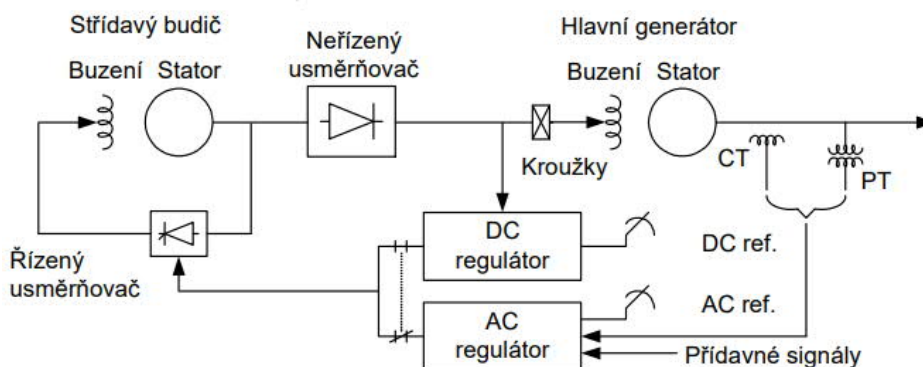
Typ budiče	Dodání stejnosměrného proudu za využití:
Stejnoscenný budič	Komutátoru a kartáče.
Střídavý budič	Usměrňovače (řízený/neřízený).
Střídavý budič	Statického usměrňovače – výstup usměrňovače připojen na kartáče sběracích kroužků budicího vinutí synchronního stroje.
Střídavý budič	Rotačního usměrňovače (bezkartáčové) – přímo na hřídeli, výstup připojen bez sběracích kroužků / kartáčů na budicí vinutí synchronního stroje.

2.3 Teoretický rozbor modelu budicího systému synchronního stroje

Druhy modelů budících souprav pro analýzu stability sítě jsou doporučeny v normě (IEEE – Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies) (6).

2.3.1 Statický budič nezávislý s neřízeným diodovým můstkem

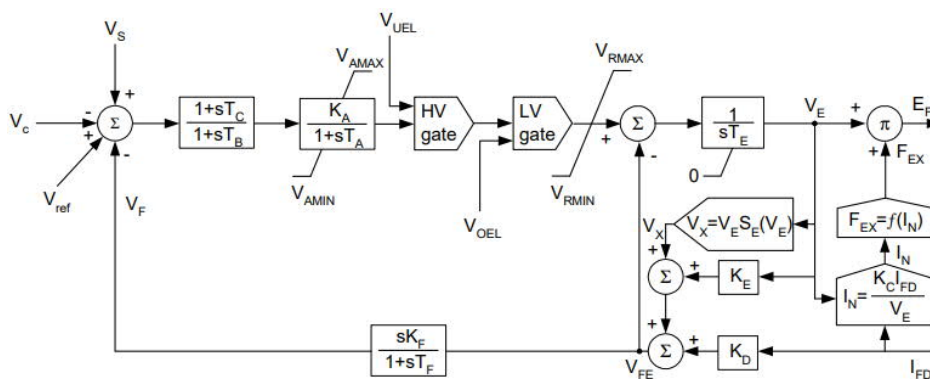
Schéma budicího systému



Obrázek 2.3 Statický budič nezávislý s neřízeným diodovým můstkem

Řízený usměrňovač, na který působí regulátor, mění budící napětí střídavého budiče. Ve schématu se vyskytují dva regulátory AC – hlavní a DC – záložní. Do AC regulátoru vstupují přídavné signály (přídavné automatiky), jeho úkolem je regulovat svorkové napětí snímané PT (měřicí napěťový transformátor) upravené proudem z CT (měřicí proudový transformátor) na zadanou referenční AC hodnotu. (1)

Model podle doporučený IEEE



Obrázek 2.4 Model STA1A

3. Popis distribuční sítě 11 kV vrtné lodi

V této kapitole bude popsána distribuční síť vn 11 kV vrtné lodi. Tato analýza sítě bude sloužit jako podklad k vytvoření modelu sítě.

3.1 Distribuce elektrické energie

Dnešní moderní lodě využívají zejména elektrického pohonu. Pro výrobu elektrické energie se používají vn generátory, které jsou poháněny diesel agregátem nebo plynovou turbínou. Lodní systémy by se z hlediska elektrických sítí daly nejlépe přirovnat k ostrovnímu provozu, přičemž tvrdost sítě je dána počtem aktuálně připojených generátorů v síti. Samotné elektrické motory pohonů jsou napájeny přes distribuční vn nebo nn síť za využití frekvenčních měničů.

Poměry v distribuční síti vn se dynamicky mění v závislosti na provozních módech lodě a enviromentálních podmínkách.

3.2 Obecná charakteristika vrtné lodi

Jak už vyplývá z názvu, tato loď je určena pro těžbu ropy či jiných surovin z mořského dna. Kromě nezbytných zařízení pro samotný pohon lodě obsahuje i vrtná soustrojí, pro které je typická věžová nástavba. Důležitou výbavou těchto lodí je jejich poziční systém. Tento systém musí umět reagovat tak, aby při jakékoliv změně okolních podmínek, nedošlo k nechtěné změně polohy lodě, a tím pádem k ohrožení vrtacích systémů. Příkladem může být náhlá změna počasí, kdy rozbouřené vlny narážejí do lopatek pohonů a tím zvyšují jejich zatížení.

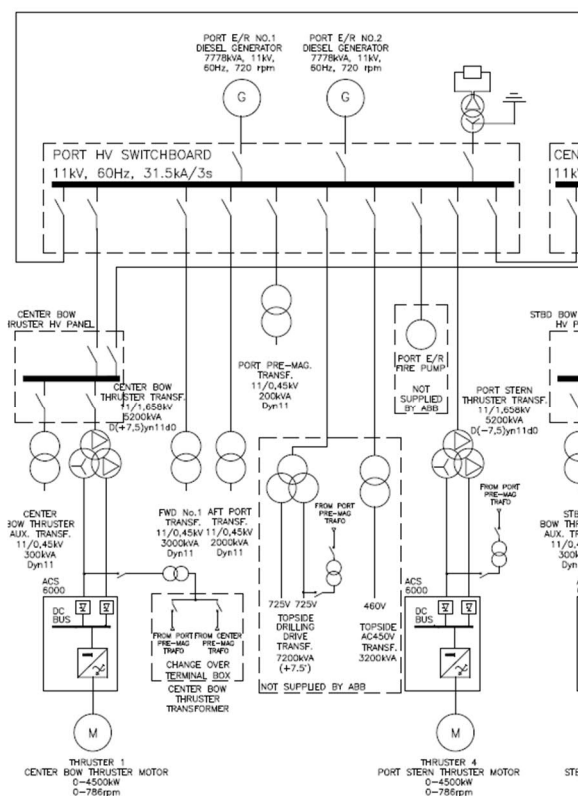


Obrázek 3.1 Seadrill loď (7)

3.3 Analyzovaná síť 11 KV

V distribuční síti se nachází 6 generátorů s dieslovým pohonem o výkonu 7 778 kVA, 3 hlavní 11 kV rozvaděče, 3 vedlejší 11 kV rozvaděče (panely), distribuční transformátory, vrtný systém, 6 lodních pohonů o výkonu až 4 500 kW, nn distribuční systém a další zařízení. Jednopolové schéma celé sítě je zobrazeno v příloze A.

Hlavní rozvaděče PORT a STBD jsou téměř identické, rozvaděč CENTER neobsahuje vrtné zařízení a požární pumpu. Všechny rozvaděče jsou vzájemně propojeny ze dvou stran spojovacími kabely tak, že systém umožňuje kruhové zapojení vn rozvaděčů.



Obrázek 3.2 Rozvaděč PORT

Vedlejší rozvaděče (panely) slouží pro napájení pohonů lodi v přední části plavidla. Všechny elektrické motory pohonů jsou napájeny z frekvenčních měničů přes třívintuřové transformátory.

Dále hlavní rozvaděč obsahuje zemnicí transformátor, dva distribuční transformátory (AFT 3000 kVA, FWD 2000 kVA) pro nn rozvod dalších zařízení lodi, před-magnetizační transformátor a požární pumpu. Vrtný systém se skládá z třívintuřového transformátoru pro frekvenční měnič a distribučního transformátoru.

Tato síť byla navržena dle požadavků námořního schvalovacího úřadu American Bureau of Shipping (ABS), která zahrnuje technické standarty a doporučení pro výstavbu a následný provoz plavidel. Norma předepisuje požadavky na systém chránění, zálohování jednotlivých komponentů (lodní pohony, generátory, rozvaděče apod.) a funkcí řídicích systémů.

3.3.1 11 kV Rozvaděč UniGear ZS1

Tento rozvaděč je kovově krytý, vzduchem izolovaný, 3fázový a přizpůsobený pro vnitřní instalace. Je vysoce modulární a tudíž, je možné přizpůsobit jednotlivé kabinety dle potřeby, mohou být jednoúrovňové či dvouúrovňové. Podle normy IEC62271-200, která pojednává o vysokonapěťových kovových rozvaděcích 1kV až 52 kV, spadá tento rozvaděč do kategorie LSC-2B-PM. (8)

Následující tabulka popisuje typy jednotlivých kabinetů jednoho rozvaděče.

Tabulka 2 Druhy použitých polí v rozvaděči UniGear analyzované sítě (8)

Typ kabinetu	Popis kabinetu	Vypínač
A	Přívod z generátoru	3pólový vypínač HD4/P SF ₆
B	Propojovací přípojnice	3pólový vypínač HD4/P SF ₆
C	Měřicí jednotka	VN stykač VSC/P
F	Transformátorové přípojnice	3pólový vypínač HD4/P SF ₆
G	Motorové přípojnice	VN stykač VSC/P
N	I/O kabinet*	(-)
P	Přípojnice pro VN panel	3pólový vypínač HD4/P SF ₆

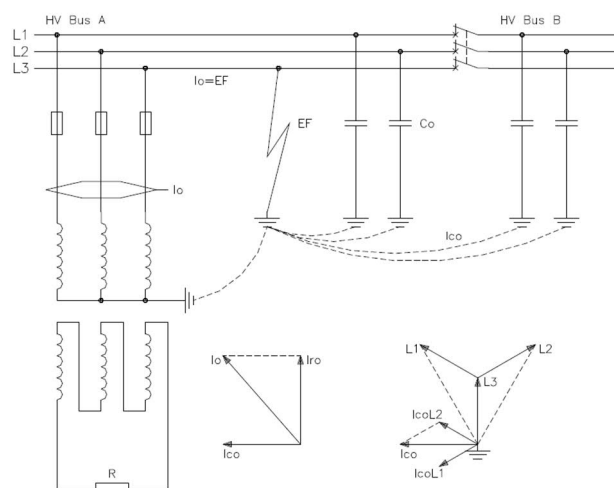
Základní parametry rozvaděče

- Jmenovitá frekvence 60 Hz,
- Jmenovité napětí 11 kV, jmenovité izolační napětí 12 kV,
- Jmenovitý krátkodobý výdržný proud 31,5 kA, 3s,

Zemnicí soustava

Síť rozvaděče je provozována jako izolovaná (IT) s rezistorem v nulovém bodě vn sítě připojeným přes zemní transformátor.

Při zemním spojení nedochází ke zkratu, ale ke vzniku zemního proudu (I_{c0}). Tento proud může zapříčinit přepětí, el. výboje, jiskření apod, které jsou nežádoucí z důvodu možného vzniku požáru při poruše. Hodnota I_0 se odvíjí od napětí sítě s příčnou admitancí (tvořena kapacitami proti zemi C_0). (9)
(10)



Obrázek 3.3 Zemnicí soustava (10)

3.4 Systém chránění

Každé pole rozvaděče je chráněno moderními digitálními ochranami IED (Inteligentní elektronická zařízení) REG630, REF615 a REM615, které slouží k chránění, řízení, monitorování vývodů, ovládání apod. Jsou to produkty skupiny Relion ® společnosti ABB. Tyto ochrany jsou multifunkční a jejich přehled je zobrazen v následující Tabulce 3.

Tabulka 3 IED Ochrany – přehled funkcí

Typ Ochrany	ANSI	Kabinet (Typ)
Třífázová nesměrová nadproudová ochrana	50/51	A, B, F, G
Třífázová směrová nadproudová ochrana	67	A, B, P, F
PT-100 teplotní senzory připojené na rozvaděč	49GT	A
Podfrekvenční ochrana	81U	A, B
Nadfrekvenční ochrana	81O	A, B
Podpět'ová ochrana	27	A, B, F, G, P
Třífázová přepět'ová ochrana	59	A, B
Přepět'ová ochrana, vyhodnocení nulové složky	59G	B
Směrová zemní ochrana	67N	A, F, G, P
Stabilizovaná třífázová diferenciální ochrana pro generátory	87G	A
Třífázová ochrana proti podbuzení	40	A
Ochrana proti přebuzení	24	A
Nadproudová ochrana vyhodnocující zpětnou složku proudu	46 G/M	A
Záblesková ochrana	50L/50NL	B, F, G, P
Tlakový spínač	63	A
Zpětná wattová ochrana	32R	A
Směrové aktivní přetížení	32P	A

Kontrola vypínacího obvodu	TCM	A, B, F, P, G
Kontrola proudového obvodu	MCS3I	A, B, F, P, G
Funkce kontroly poruchy pojistek (jištění)	60	A, B, F, P, G
Monitorování provozních podmínek vypínače	CBCM	A, B, F, P, G
Ochrana při selhání vypínače	51BF	A, B, F, P, G

Sít' je dle potřeby možno provozovat jako redundantní (propojovací přípojnice sepnuté z obou stran), případně rozdělenou na jednotlivé sekce. Tato možnost realizuje zónové chránění, což znamená odizolování dané poruchové sekce od ostatních dvou. Záložní funkce primárního ochranného systému obsahuje variantu otevření kontaktů propojovacích přípojníc a tím opět odizolování jednotlivých sekcí (koncepte redundance). (11)

Typy možných zkratů a jejich odstranění:

- Zkrat na vývodu z rozvaděče – při této poruše dojde k vypnutí postiženého vývodu a tím jeho odizolování od ostatních neporušených vývodů.
- Zkrat na přípojnici – nejdříve se odepnou propojovací vedení (odizolování celého rozvaděče s poruchou), a poté dojde k vypnutí generátorů na postiženém rozvaděči.
- Zemní spojení – opět dojde k odpojení a odizolování pouze postižené části.

Rychlé snižování zátěže

Hlavní zátěž v síti jsou lodní pohony a vrtné systémy. Pokud dojde k nečekanému odpojení jednoho z připojených generátorů a hrozilo by přetížení jiného generátoru, nebo pokles frekvence v síti, zátěže automaticky regulují svůj výkon v přesném poměru odpojeného generátoru k celkové dodávce výkonu. Zátěž reaguje pouze v případě, že je opravdu napájena z generátoru, který selhal. Ostatní pokračují v operaci bez reakce na tuto událost. Vše probíhá velice rychle, řádově do pár desítek ms, tak aby došlo k minimální změně frekvence sítě. Tímto se zajistí to, že se ostatní generátory nepřetíží a dojde k udržení stability systému.

3.4.1 Ochrany generátoru

Modul REG630 pro generátor chrání jak generátor samotný, tak i přípojnice k rozvaděči (a tím samotný rozvaděč). V následujícím textu bude popsáno několik z nich.

Monitorovací zařízení pro Generátor (DGMS)

Toto monitorovací zařízení je nezávislé. Obsahuje ho každý generátor připojený na vn rozvaděč. DGMS detekuje poruchy v síti, které byly způsobeny přebuzením či podbuzením, případně poruchy dodávky paliva motoru alternátoru. Zařízení signalizuje abnormální chování generátoru nadřazenému automatizačnímu systému lodi a je schopno indikovat a doporučit vypnutí generátoru, pokud se porucha zhoršuje. Vypnutí je zajištěno pomocí signálu z DGMS do jističe generátorové přípojnice. Funguje jako záloha pro ochranné relé.

Rozdílová ochrana

Je hlavní ochranou generátoru. Porovnává proudy na obou stranách generátoru včetně přívodního vedení. Pokud amplituda nebo fázový úhel změní svou hodnotu, ochrana vybaví bez časového zpoždění. Tato ochrana vypne hlavní jistič generátoru, odbudí generátor, a také vyšle vypínací povel pro poháněcí jednotku (diesel). Tato ochrana chrání generátor před vnitřními zkraty (např. zkrat na vinutí). (11) (12)

Nadproudová ochrana

Maximální nadproudová hodnota je nastavena na 115 % jmenovitého proudu generátoru s dlouhým časovým zpožděním. Zátěž generátoru je monitorována a řízena pomocí PMS (Power Managment System – nadřazený řídicí systém distribuce výkonu), které je schopno cíleně síť odlehčit, pokud je potřeba. Generátory nejsou konstruovány na trvalé přetížení. Pokud by PMS neodlehčilo, generátor je vypnut pomocí jeho jističe. (11) (12)

Podfrekvenční a nadfrekvenční ochrana

Provoz se hodnotou pod jmenovitou hodnotou frekvence může vyvolat vibrace v soustrojí, snížení chlazení a snížení výkonů elektromotorů na vlastní spotřebě. (12)

Ochrana proti přebuzení

Regulátor napětí generátoru se snaží neustále přibližovat nastavené referenční hodnotě, pokud dojde k selhání skutečného měřeného napětí generátoru, regulátor bude stále budit generátor, aby opět dosáhl nastavené hodnoty. Tím může vzniknout přebuzení. Monitorováním budícího proudu a jeho porovnáním s výstupním napětím a jalovým výkonem, můžeme identifikovat a vypnout poškozený generátor. Například napětí by nemělo dosahovat vysokých hodnot ve stejné chvíli, kdyby byl vysoký budící proud. (12)

Další ochrany generátoru

Zemní ochrana, zpětná wattová ochrana, teplotní senzory PT100, Nadproudová ochrana vyhodnocující zpětnou složku proudu, ochrana proti přepětí, ochrana proti podbuzení. (12) (11)

4. Modelování 11 kV sítě

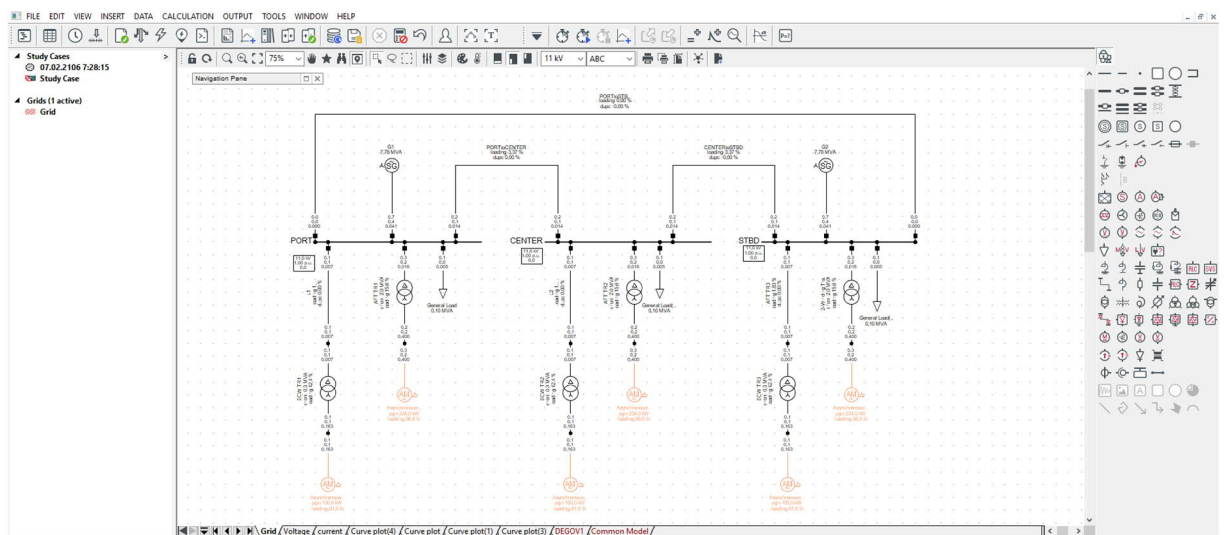
V této kapitole bude popsán postup tvorby modelu distribuční vn sítě 11 kV vrtné lodi, a také parametry modelů jednotlivých zařízení v prostředí programu Digsilent Power Factory 2018. Tento software je využíván pro analýzy (dynamická a statická stabilita, frekvenční stabilita) a výpočet (zkratové poměry v síti, zatížení) různých typů i částí elektrických sítí (přenosové a distribuční sítě, industriální sítě, obnovitelné zdroje).

4.1 Úvod k programu Digsilent Power Factory 2018

Digsilent Power factory funguje na principu základních modelů jednotlivých částí sítě (*ElementType*) s jeho přednastavenými vstupními daty (*Basic Data*), podle kterých je nutné jednotlivé elementy nakonfigurovat. Jak již bylo zmíněno, program je schopen provádět různé druhy výpočtu, analýz a simulací. V této diplomové práci je využito simulace RMS a výpočet chodu sítě.

Simulace RMS je vhodná zejména pro zkoumání krátkodobé dynamické stability (úhlové přechodné stability, frekvenční stability, nastavení regulátorů (AVR, PSS, GOV apod.), mezní doby trvání zkratu apod). Pro tuto simulaci bylo potřeba zadat dodatečné vstupní parametry. Doporučený čas je od 400 ms do desítek sekund. Před prováděním samotné RMS simulace, je třeba provést výpočet počátečních podmínek (*Calculate Initial Conditions*), který tento počáteční stav soustavy verifikuje na základě výpočtu chodu sítě. Výpočet chodu sítě využívá Newton – Rhapsodovy metody (kap.1.6). (13)

Tato simulace je tvořena na základě definovaných událostí (*Simulation Events*) ve zvoleném čase. Jako událost lze považovat například trojfázový zkrat, odpínání jističů, změnu zatížení, změnu parametru AVR regulátoru apod.



Obrázek 4.1 Prostředí programu Digsilent Power Factory 2018

4.2 Vstupní parametry modelů

4.2.1 Diesel generátory

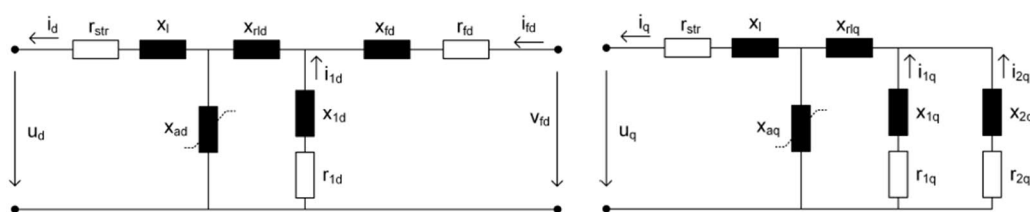
Diesel generátory jsou namodelovány jako synchronní stroje s regulátorem buzení a pohonu (turbíny).

Tabulka 4 Vstupní parametry generátorů G1, G2

Základní data		Data pro Simulaci RMS		
Jmenovitý výkon S_n	7,778 MVA	Moment setrvačnosti J	J	1305 kgm ²
Jmenovité napětí U_n	11 kV	Počet pól párů	(-)	5
Účinník	0,9 (-)	Odpor statorového vinutí	r_{str}	0,0718 Ω
Zapojení	Hvězda (Y)	Podélná přechodná časová konstanta	T_d'	0,983 s
Jmenovité otáčky	720 rpm	Podélná rázová časová konstanta	T_d''	0,01216 s
Jmenovitá frekvence	60 Hz	Podélná synchronní reaktance	x_d	1,708 p.u.
		Podélná rázová reaktance	x_d''	0,171 p.u.
		Podélná přechodná reaktance	x_d'	0,278 p.u.
		Příčná rázová časová konstanta	T_q''	0,0222 s
		Příčná synchronní reaktance	x_q	0,919 p.u.
		Příčná přechodná reaktance	x_q'	0,3 p.u.
		Příčná rázová reaktance	x_q''	0,193 p.u.

Pro správné nastavení modelu v Digsilentu bylo nutné přepočítat odpor statorového vinutí dle vzorce:

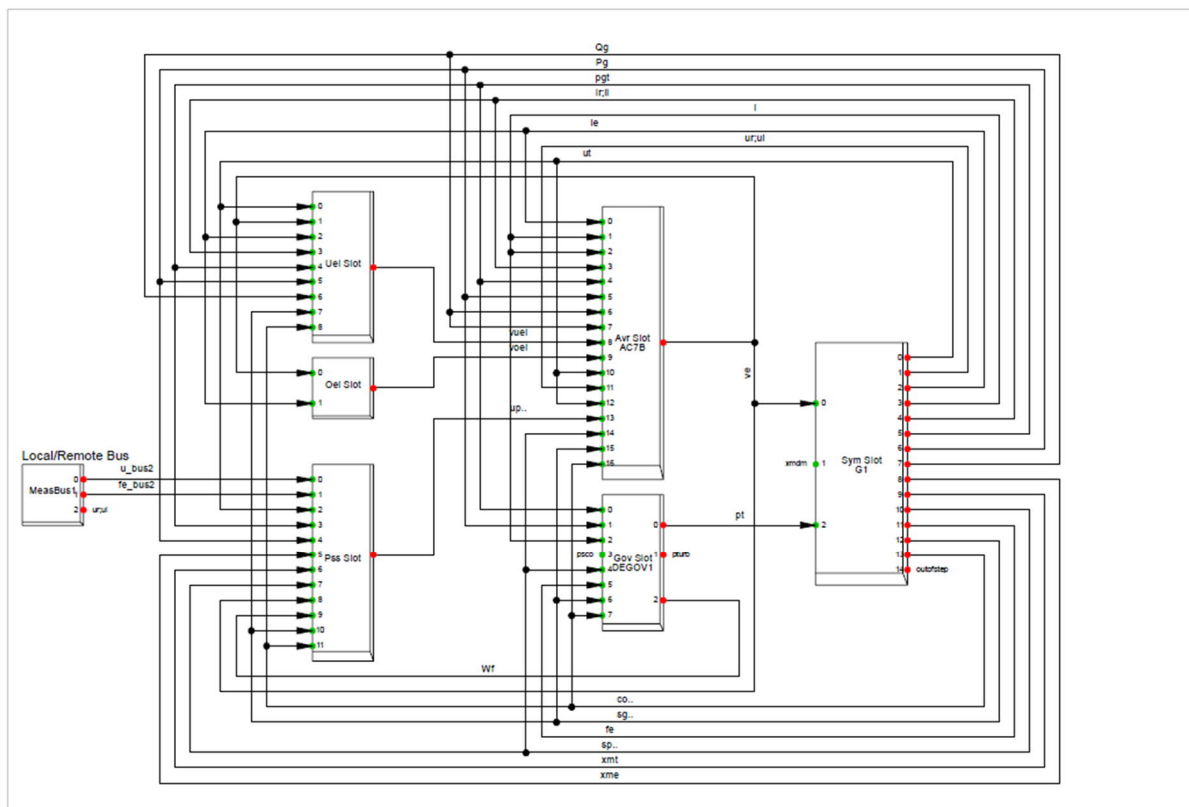
$$r_{str} = \frac{R_{str}}{\frac{U_n^2}{S_n}} = 0,0718 * \frac{11000^2}{7,778 * 10^6} = 0,004615 \text{ p.u.} \quad (4.1)$$



Obrázek 4.2 Náhradní schémata model synchronního stroje v Digsilentu (13).

Model generátorového bloku v prostředí Digsilent

Digsilent nabízí kompletní nastavení regulačních prvků generátoru – výkonový systémový stabilizátor PSS, AVR apod. Na obrázku níže je uvedeno přehledové schéma celého modelu včetně signálových vazeb. V této práci bude nastaven pouze slot modelu regulátoru buzení (AVR Slot – model AC7B) a model regulátoru diesel pohonu (GOV Slot – DEGOV1). Blokové schéma obou modelů je převzato z interní knihovny Digsilentu. Nastavení parametrů modelu je vysvětleno v kap 4.3.



Obrázek 4.3 Přehledové schéma bloku generátoru v prostředí Digsilent.

4.2.2 Transformátory

V modelu sítě jsou použity dva typy dvouvinutových transformátorů – BOW a AFT, které jsou doporučeny pro reprezentaci distribučních transformátorů (13). Celkem se jich v modelu sítě nachází 6.

Tabulka 5 Vstupní hodnoty typů transformátoru AFT a BOW

Vstupní hodnoty	Typ AFT	Typ BOW
	AFT TR, AFT TR2, AFT TR3	BOW TR1, BOW TR2, BOW TR3
Jmenovitý výkon S_n	2 MVA	0,3 MVA
Jmenovité primární napětí U_{n1}	11 kV	11 kV
Jmenovité sekundární napětí U_{n2}	0,45 kV	0,45 kV
Zapojení	Dyn11	Dyn11
Zkratová reaktance X_{sc} (%)	0,84	1,65
Zkratová resistance R_{sc} (%)	5,94	5,77
Napětí nakrátko u_{sc} (%)	5,999	6,001

Pro výpočet napětí nakrátko byl použit tento vzorec $u_{sc} : Z_{sc} = \sqrt{R_{sc}^2 + X_{sc}^2}$, $u_{sc} = Z_{sc} * 100$. (4.2)

4.2.3 Model zátěže

Pro účely této diplomové práce byly nízkonapěťové zátěže distribučních transformátorů namodelovány částečně jako ekvivalentní asynchronní motory (výkon 234 kW, účinník 0,81 ind.) a odporová zátěž 100 kW. Použití asynchronního ekvivalentních motorů vychází z normy IEC 61363-1 (14).

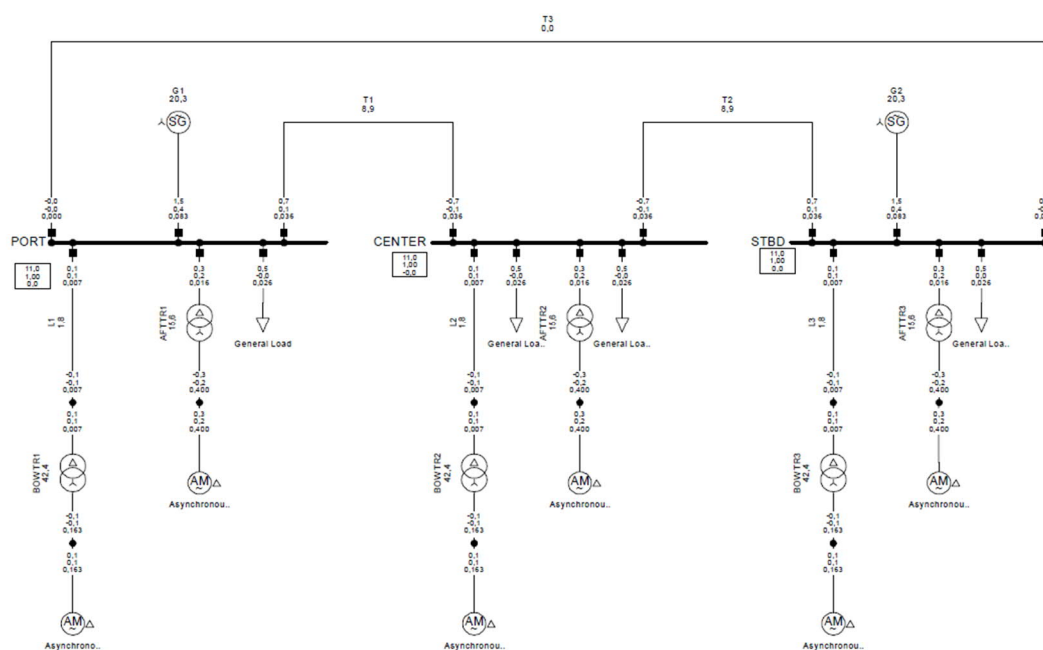
4.2.4 Model kabelového vedení

V modelu jsou použity dva typy kabelových vedení – propojovací mezi hlavními rozvaděči a mezi hlavním a vedlejším rozvaděčem.

Tabulka 6 Vstupní data kabelových vedení

Název	Délka (m)	Průřez (mm ²)	Materiál	R (20°) (Ω/km)	X (Ω/km)	U (kV)	I _n (kA)	T _{max} (°C)
Vedlejší (L1, L2, L3)	243	120	Měď	0,154	8,43	11	19,9	250
Propojovací (T1, T2,)	15	150	Měď	0,126	7,767	11	19,9	250
Propojovací (T3)	30	150	Měď	0,126	7,767	11	19,9	250

Výsledný model sítě



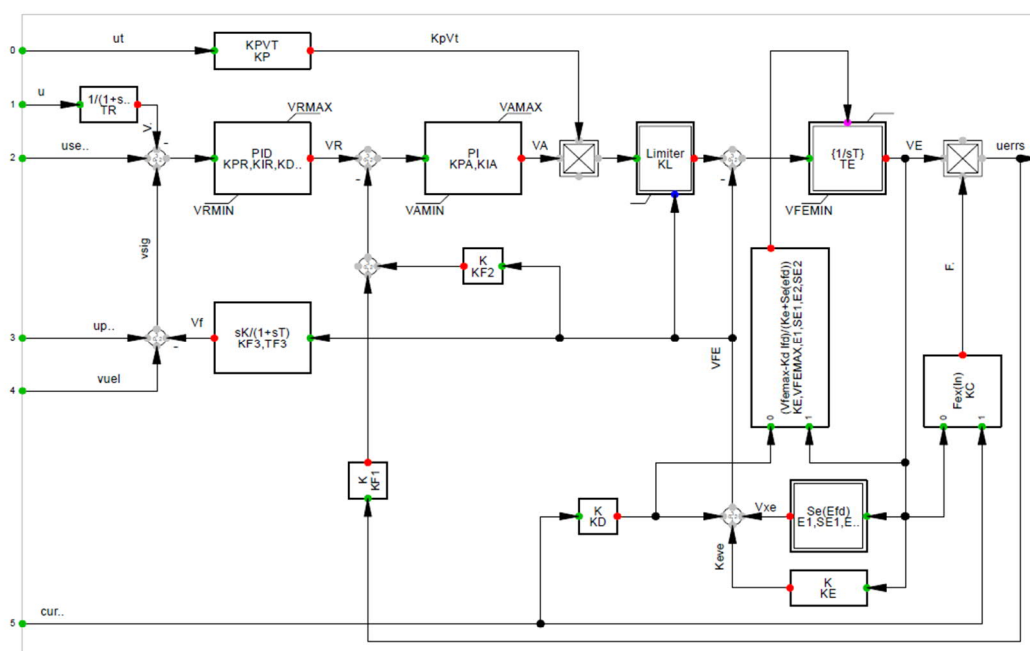
Obrázek 4.4 Model sítě

Chování regulátoru při zkratu

Při vzniku zkratu na generátoru, klesne hodnota napětí na nulu. Při tomto stavu by regulátor stroj neustále přibuzoval a snažil se opět dosáhnout referenční hodnoty. Z tohoto důvodu je zde proudový transformátor 3CT (za normálních podmínek zkratován), kdy při zkratu AVR otevře kontakty spínače K2 a transformátor začne dodávat proud přes dva usměrňovače V2 a V1 budiči. Budicí proud v tento moment není regulovaný AVR, ale je limitovaný proudovým omezovačem ECL-10 na hodnotu zkratového proudu $3xI_n$. Tento omezovač reaguje s určitým časovým zpožděním. (15)

4.3.2 Model regulátoru buzení AC7B

Doporučeným modelem bezkartáčového točivého budicího systému s regulátorem napětí je model AC7B (16) (6).



Obrázek 4.7 Model regulátoru buzení AC7B

Rozdílem oproti skutečnému regulátoru je zejména chybějící funkce omezovače proudu ECL-10, nazývaný *boost for short circuit support* (Obrázek 4.5). UNITROL 1000 také obsahuje funkci *autotuning*, tato funkce spočívá ve změně parametrů PID regulátoru, pokud dochází k dosažení limitů (VRMAX, VRMIN, VAMAX, VAMIN).

4.3.3 Výpočet parametrů regulátoru buzení

Pro nastavení parametrů regulátoru UNITROL 1000 existuje interní doporučení společnosti ABB, jak tyto parametry vypočítat (16). Tento postup byl částečně upraven tak, aby bylo dosaženo co nejlepší možné odezvy.

Vstupními hodnotami pro výpočet je základní nastavení parametrů zesílení a časových konstant. Model regulátoru lze rozdělit na část pro PID regulaci a část regulace budiče. Tyto dvě části musí spolu korelovat. Hodnoty pro PID část byly získány z testování generátoru analyzované sítě, hodnoty pro budič byly převzaty (částečně z typových parametrů z knihovny Digsilent, částečně z doporučení pro výpočet). Předpokladem pro použití těchto hodnot je podobné napětí U_{E0} (při srovnání s technickou specifikací analyzovaného generátoru).

Tabulka 7 Vstupní hodnoty výpočtu parametrů

Parametr	Hodnota
Část PID regulace	
V_p – proporcionální složka P	7,5
T_b – derivační složka D	0,2 s
T_a – integrační složka I	3 s
Parametr <i>droop</i> (odchylka)	4 %
Parametr $K_{ceiling}$ (zesílení)	7,71 V/V
Část regulace budiče	
T_e – časová konstanta budiče	0,2 s
K_d – demagnetizační faktor (hysterezní ztráty)	0,5
K_e – zesílení budiče (budič s permanentním magnetem na 1 vinutí)	1
K_c – zesílení usměrňovače	0,55

Faktor K_{Ceil}

Pro tento faktor lze využít výpočet z dat budiče:

$$K_{Ceil} = \frac{U_{emax}}{U_{eo}} (V/V), U_{emax} = x * UPWR - 8 (V) \quad (4.2)$$

Druhou variantou (a zvolenou) je využití naměřených dat z testu generátoru $K_{Ceil} = 7,71 V/V$.

Saturační faktor generátoru K_{sat}

Tento faktor je definován za pomoci budicího proudu při nezátíženém stavu (I_{fdo}). Hodnota tohoto proudu byla uvedena v dokumentu popisující generátor samotný i v testu. Obě hodnoty byly téměř totožné.

$K_{sat} = I_{fdo} = 0,44705 p.u.$, tento proud bylo nutné přepočítat na jednotku per unit:

$$I_0 = 3,8 A \rightarrow I_0/I_{base} = 0,44705 p.u. \quad (4.3)$$

Parametr V_E

Tento parametr je vypočítán za pomoci zadaného parametru budiče K_C .

$$K_C \leq 0,5773$$

$$V_E = K_{sat} * (1 + 0,5773 * K_C) = 0,47286 \text{ p. u.} \quad (4.4)$$

Napětí budiče U_{e0pu}

Tento parametr zohledňuje vlastnosti budiče – demagnetizační faktor K_D .

$$U_{e0pu} = V_E + I_{fd0} * K_D = 2,36836 \text{ p. u.} \quad (4.5)$$

Napětí budiče U_{ebase}

Hodnota napětí budiče při zatížení $U_{e0} = 38,2 \text{ V}$.

$$U_{ebase} = \frac{U_{e0}}{U_{e0pu}} = 16,1295 \text{ V} \quad (4.6)$$

Faktor $K_{Ceiltheo}$

Hodnota napětí $U_{emax} = 136,92 \text{ V}$. Tato hodnota byla vypočítána za pomoci maximálního proudu budiče uvedeného v testu generátoru.

$$K_{Ceiltheo} = \frac{U_{emax}}{U_{ebase}} = 8,4887 \text{ V} \quad (4.7)$$

Konstanta V_{peff}

Tato konstanta zohledňuje teoreticky vypočítaný faktor $K_{Ceiltheo}$, skutečný faktor K_{Ceil} a proporcionální zesílení V_p regulátoru. Zde se nabízí dvě varianty:

- 1) Zahrnout teoretický faktor $K_{Ceiltheo}$.

$$V_{peff} = V_p * \frac{K_{Ceiltheo}}{K_{Ceil}} = 6,16564 \text{ p. u.} \quad (4.7)$$

- 2) Modifikovat výpočet a použít pouze faktor K_{Ceil} .

$$V_{peff} = V_p * K_{Ceil} = 57,825 \text{ p. u.} \quad (4.8)$$

Konstant V_{peff} velmi ovlivní další výpočet. Obě tyto varianty byly testovány a jako výsledná je zvolena varianta b).

Limity PID regulátoru

$$V_{Amax} = V_{Rmax} = 0,99 * K_{Ceil} = 7,6329 \text{ p. u.}$$

$$V_{Rmin} = -V_{Rmax} = -7,6329 \text{ p. u.}$$

$$V_{Amin} = 0,005 * K_{Ceil} = 0,03855 \text{ p. u.}$$

Výsledné parametry regulátoru AC7B

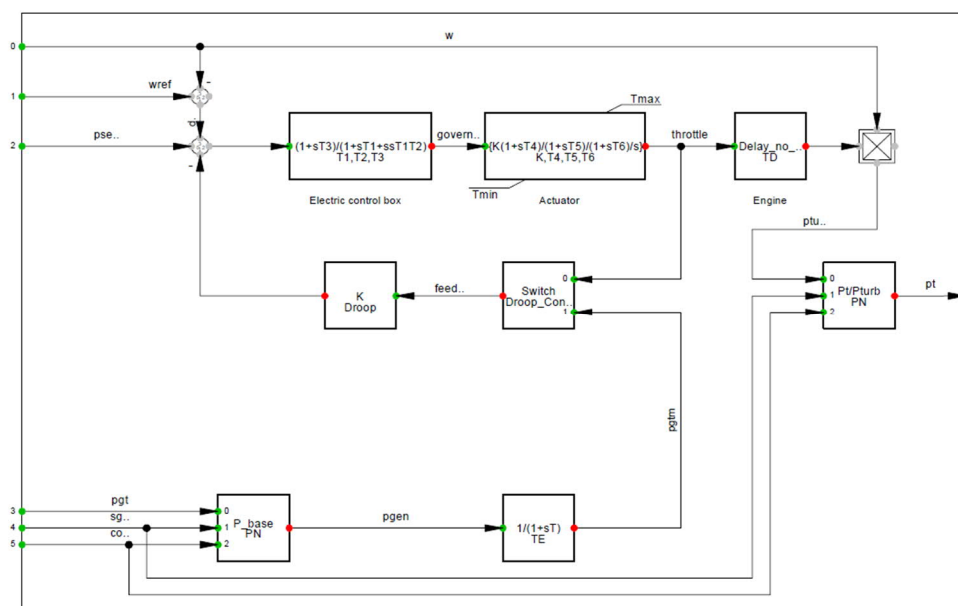
Parametry E1, E2, SE1, SE2, VFEMAX byly převzaty z normy IEEE (6).

Tabulka 8 Parametry regulátoru AC7B

Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
TR	0,02	KL	5
KPR	1	KE	0,04
KIR	0	KF2	0
KDR	0,2	KD	0,5
TDR	0,06	KP	0
KPA	57,825	KF1	0
KIA	19,25	KC	0,55
KF3	0	TE	0,2
TF3	1	VFEMAX	8
E1	6,5	VRMIN	-7,6329
SE1	0,3	VAMIN	0,03855
E2	9	VFEMIN	0
SE2	3	VRMAX	7,6329

4.3.4 Model pohonu DEGOV1

Jako model primárního pohonu (diesel pohonu) je zvolen model z knihovny Digsilent DEGOV1 vyvinut společností Woodward. Tento model obsahuje regulátor rychlosti, akční člen a model pohonu. Je zde také zahrnut parametr *droop*, který zohledňuje výkon poháněcího motoru v závislosti na frekvenci sítě. Pokud je zatěžován generátor (odebírán vyšší výkon), klesají otáčky a frekvence.



Obrázek 4.8 Model pohonu DEGOV1

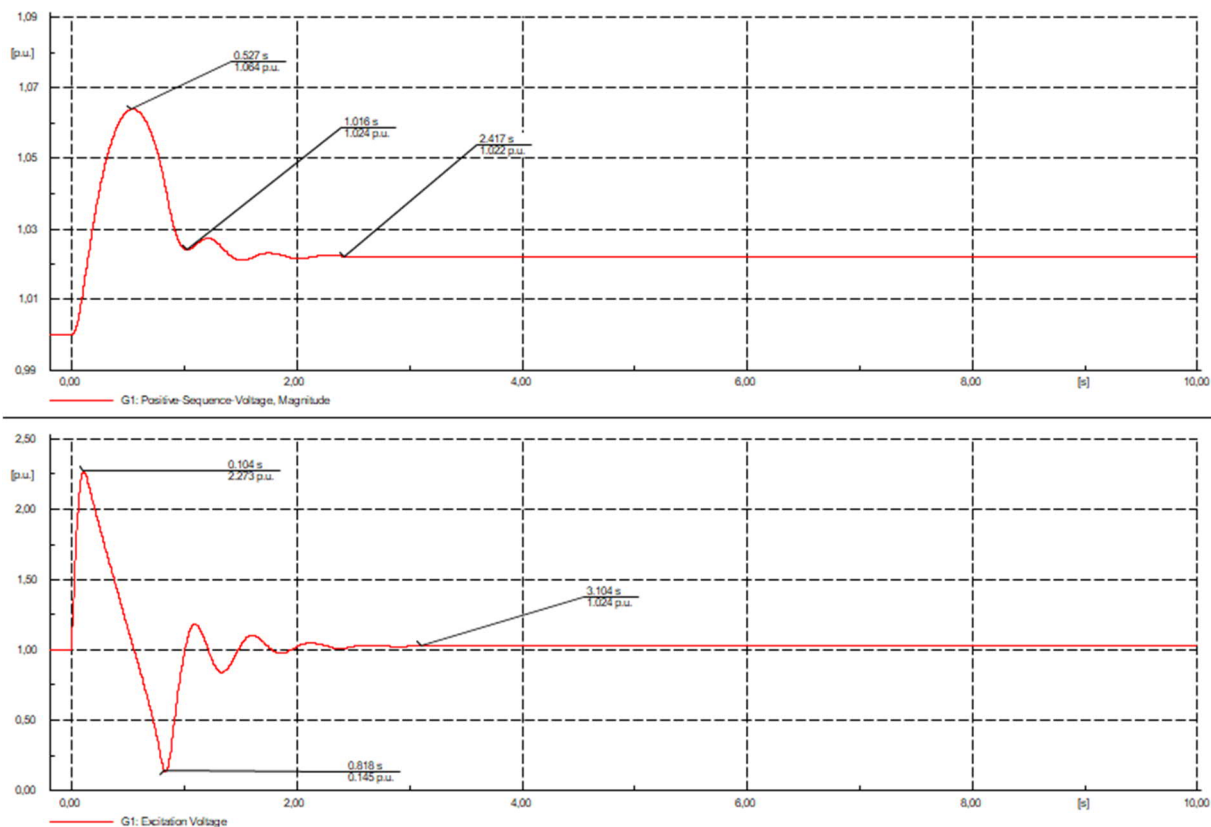
Parametry modelu byly převzaty z knihovny Digsilentu a částečně upraveny, aby korelovaly s regulátorem buzení (parametr K , T_3).

Tabulka 9 Parametry modelu

Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
K	3	T_5	0,1
T_1	0,1	T_6	0,2
T_2	0,1	Droop	0,02
T_3	0,35	T_e	0,1
T_4	0,9	T_D	0,03

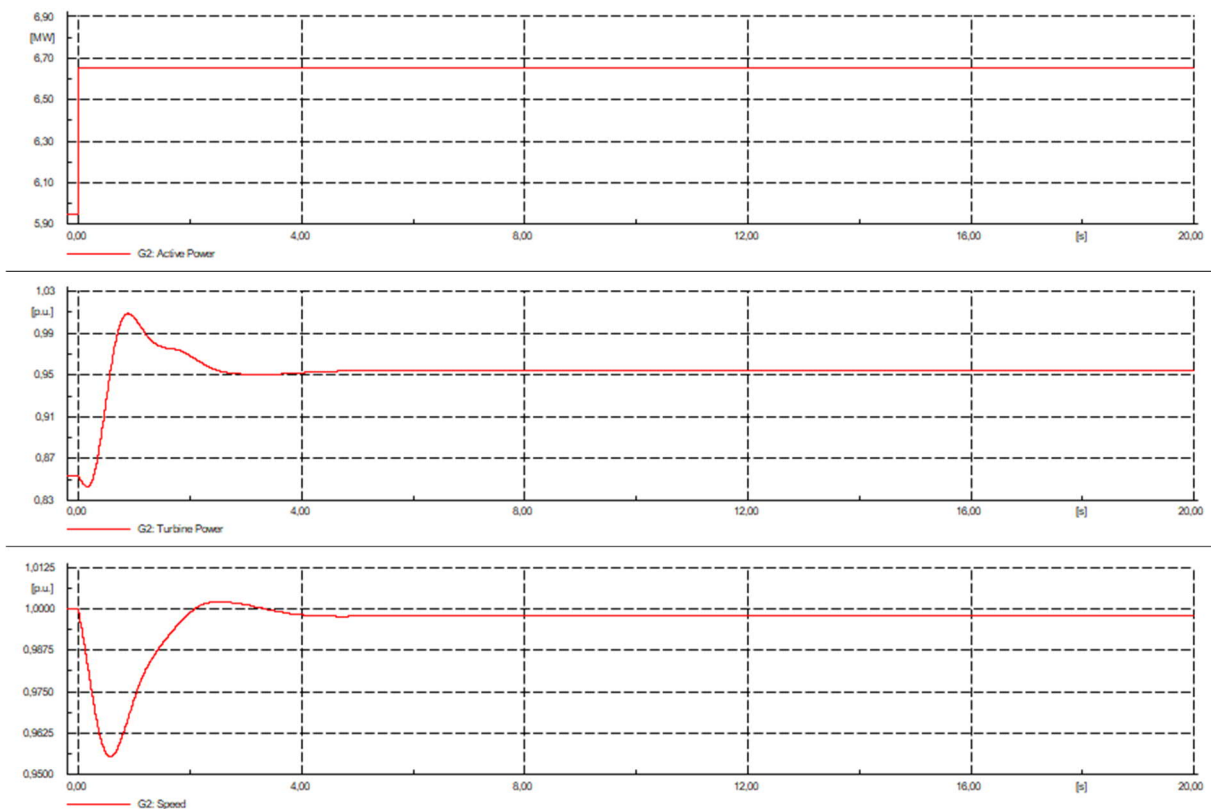
4.3.5 Skoková odezva soustavy

Pro ověření chování generátoru s oběma modely byl simulován test AVR na skokové zvýšení napětí o 2 % v zatíženém stavu a test PCU o skokové zatížení o 2 %.



Obrázek 4.9 AVR test

Horní graf reprezentuje průběh napětí, spodní graf průběh budicího proudu. Pro napětí je doba náběhu 527 ms, výška překmitu 1,064 p.u. (skoková změna 1,002 p.u.), čas odeznění překmitu a vznik malých oscilací 1,016 s, doba ustálení na požadovanou hodnotu 2,417 ms. Tato doba je poměrně dlouhá a nežádoucí. Tento jev může být způsoben typovými parametry části budiče. Pro budicí proud lze pozorovat poměrně ostré oscilace, ale rychlou reakci.



Obrázek 4.10 PCU test

Horní graf popisuje průběh činného výkonu – zvýšení o 2 %. Prostřední a spodní graf popisují chování regulátoru modelu pohonu. Prostřední graf reprezentuje výkon turbíny, spodní graf otáčky. Viditelná reakce je žádoucí – při zvýšení zatížení diesel pohon reaguje snížením otáček a s časovou prodlevou zvyšuje výkon turbíny. Jelikož má tento model nastaven procentuální pokles (*droop*) výsledná nová rychlost se nevrací zpět na hodnotu 1, ale na hodnotu 0,998.

5. Ověření modelu s průběhy veličin z reálného měření

V této kapitole budou modely regulátorů srovnány a ověřeny s reálnými naměřenými daty analyzované sítě za využití simulace třífázového zkratu na jednom z rozvaděčů. Primárním účelem testovacího reálného zkratu na vn síti bylo ověření ochranných funkční rozvaděče.

Popis reálného měření

- 1) Vytvoření trojfázového zkratu na rozvodně PORT.
- 2) Zapůsobení ochran na vznik nadproudu:
 - a. Odpojení přívodů 200 ms po vzniku zkratu.
 - b. Odpojení propojovacích vedení mezi hlavními rozvaděči PORT a STBD po 200 ms od vzniku zkratu.
 - c. Odpojení přívodu pro generátor na rozvaděči PORT po 1 s od vzniku zkratu.

Následek

- 1) Odizolování postižené sekce PORT pro zamezení šíření poruchy – beznapěťový stav

Počáteční podmínky před zkratem:

Měření probíhalo v přístavu, tudíž vrtná zařízení a vlastní pohony nebyly v provozu. Zátěží (příspěvkem do zkratu) byla pouze pomocná nízkonapěťová zařízení jako například pumpy, větráky, topení, osvětlení apod.

5.1.1 Simulace zkratu v Digsilentu

Pro simulaci měření byla modelovaná síť zjednodušena, nastavení modelů a schéma sítě viz kap. 4.

Počáteční podmínky:

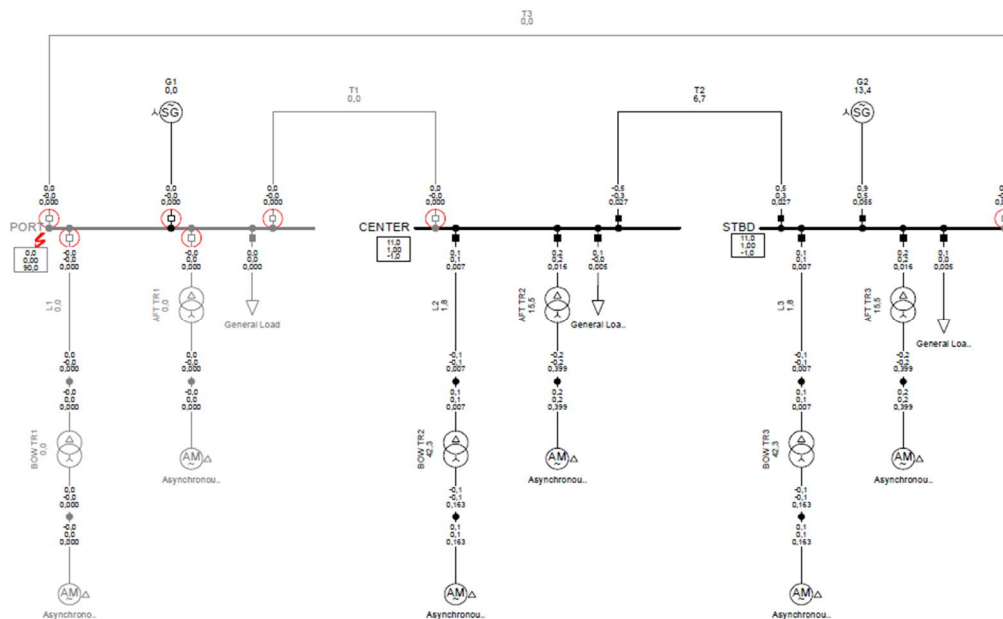
- Oba generátory byly zatíženy rovnoměrně (10 % plného zatížení).
- Celkový výkon zátěže $P=1,05 \text{ MW}$, $Q=0,77 \text{ Mvar}$.
- Topologie sítě – okružní.

Scénář simulace

- 1) Simulace trojfázového zkratu ($Z=0,00 + j0,00 \Omega$) na terminálu PORT.
- 2) Otevření vývodných jističů včetně postižené sekce 200 ms.
- 3) Otevření jističe pro generátor G1 v čase 1 s.

Stav sítě po proběhnutí simulace

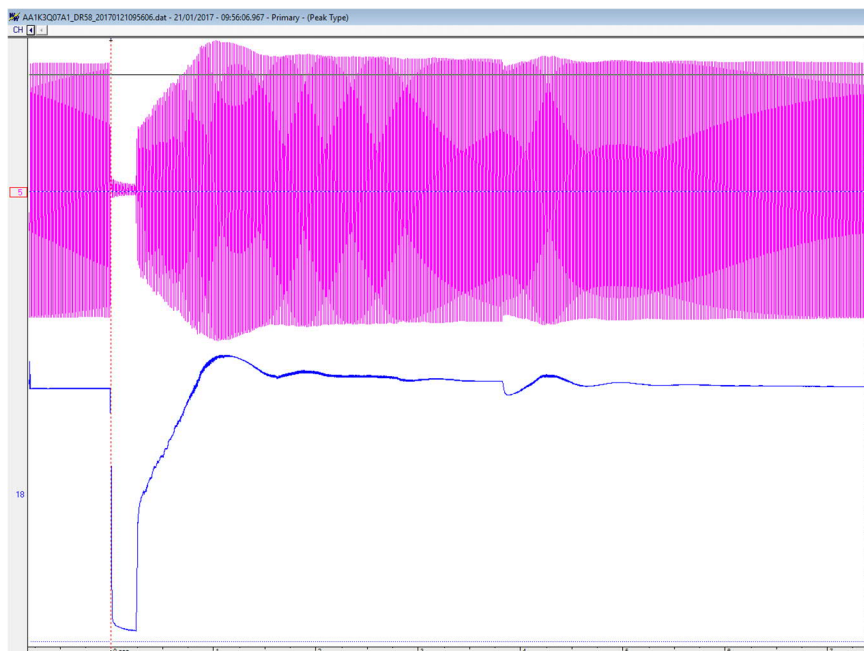
- Šedá barva značí beznapěťový stav na rozvaděči PORT.
- Grafické zobrazení simulace je reprezentováno zaznačením odpojení jističů a místem zkratu.



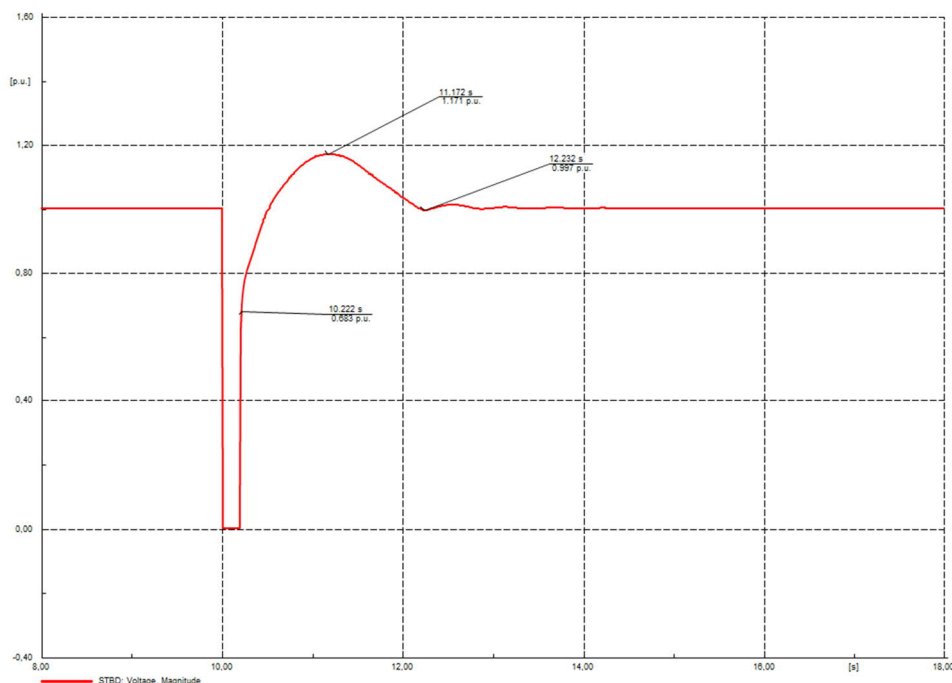
Obrázek 5.1 Stav sítě po proběhnutí simulace

5.1.2 Porovnání výsledku s naměřenými hodnotami

Pro ověření modelu bylo vybráno měření zaznamenané na IED ochraně přívodu generátoru G2 na rozvaděči STBD. Toto měření bylo potřeba upravit. Záznam obsahuje vykreslené grafy pro okamžité fázové napěťové hodnoty v čase (růžové křivky). Program pro zobrazování těchto grafů (*WAWWIN ABB*) nabízí možnost vykreslení pouze obálky napětí – modrá křivka.



Obrázek 5.2 Srovnávací charakteristika z reálného měření



Obrázek 5.3 Charakteristika napětí na rozvaděči STBD simulovaného modelu

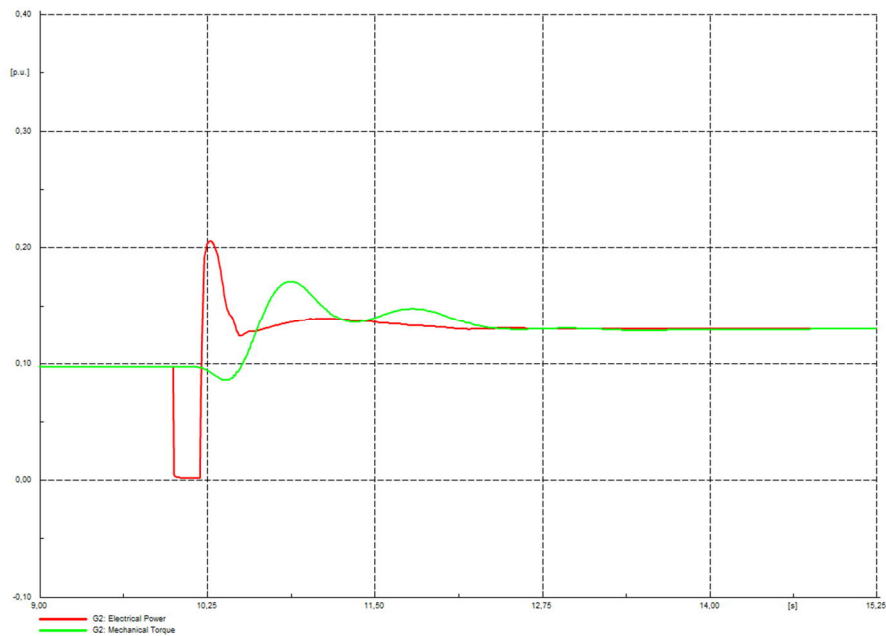
Grafy není možné posuzovat z pohledu hodnot napětí, jelikož zkratový proud vyvolaný poruchou se může lišit od simulovaných hodnot. Model simulace obsahuje ekvivalentní motory a odporovou zátěž, tudíž zkratové příspěvky těchto motorů, a tím velikost zkratového proudu jsou jiné. Z tohoto důvodu byly vyloučeny 3 časové body od vzniku zkratu v obou grafech a porovnány.

- Bod 1 – start regulace, v obou křivkách shodný čas (cca 220 ms od doby vzniku zkratu)
- Bod 2 – maximální amplituda, v obou křivkách shodný čas
 - 1,171s simulace
 - 1,146s měření
- Bod 3 – doba ustálení
 - 2,232s simulace
 - 1,626s měření

Z výše definovaných bodů je zde hlavním poznatkem fakt, že simulovaný model regulátoru má delší čas ustálení než ve skutečnosti – téměř o 1 s, tento jev lze již pozorovat na skokové odezvě. Doba náběhu a překmit se shodují. Tvar obou křivek je téměř podobný, rozdílem je lineární sklon křivky měření. Z toho chování lze dedukovat, že simulace teoreticky vykazuje ideálnější nastavení parametrů regulátoru.

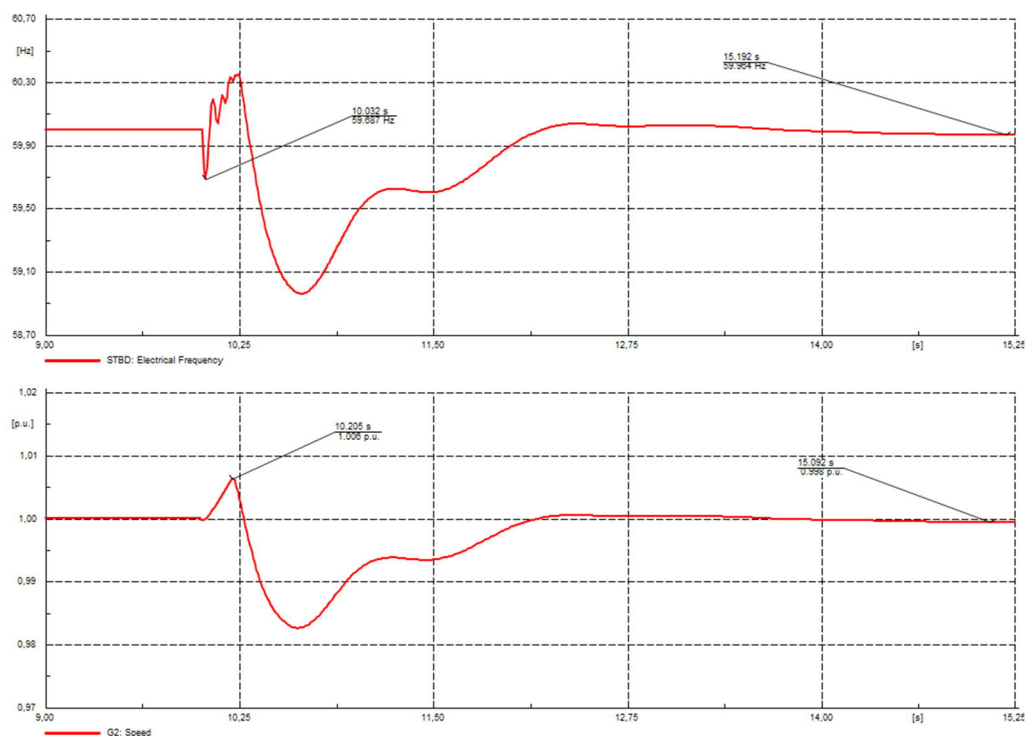
5.1.3 Další výsledky simulace přechodného děje

Na grafu níže je zobrazen průběh elektrického výkonu generátoru G2 a reakce mechanického výkonu turbíny. Po odpojení postižené části rozvaděče, kromě reakce generátoru G2 na zkratový proud, lze pozorovat ráz činného výkonu. Model sítě před zkratem obsahoval 3 sekce pouze s dvěma generátory, poměrné rozdělení zátěže na jeden generátor je roven 1,5. Nastaly dva přechodné stavy – reakce na trojfázový zkrat a přerozdělení výkonu. Mechanický moment turbíny reaguje se zpožděním.



Obrázek 5.4 Červená křivka – výkon generátoru, zelená křivka – mechanický moment turbíny

Vzhledem k tomu, že po zkratu zůstává pouze jen jeden generátor připojen (sít' je měkká), frekvence reflektuje chování napětí a otáčky generátoru G2. První vyznačený bod na grafu frekvence je reakce na pokles napětí (59,687 Hz), nová ustálená hodnota frekvence je 59,964 Hz. Odchylka od jmenovité frekvence Δf je 0,036 Hz. Tato odchylka je způsobena vlastnostmi modelu regulátoru pohonu. Po zapůsobení regulace na jakýkoliv přechodný děj bude vždy odchylka otáček od jmenovité hodnoty.



Obrázek 5.5 Horní graf – frekvence na rozvaděči STBD, spodní graf – otáčky generátoru G2

Reakce soustavy na tento přechodný děj je nalezení nového ustáleného stavu. Napětí se ustálilo zpět na svou původní hodnotu 1 p.u., otáčky synchronního generátoru poklesly o nastavenou hodnotu 0,02 p.u. Z pohledu úhlové stability lze říci, že moment setrvačnosti synchronního generátoru (jeho rezervy v kinetické energii) byly dostatečné. Akcelerační plocha při tomto přechodném ději byla menší než plocha brzdící. Zkrat byl odpojen dříve, než byla překročena mezní doba trvání zkratu pro tento synchronní stroj. Celkový čas nalezení nového ustáleného stavu je přibližně 2,5 s.

Závěrem pro tuto simulaci je poznatek, že přes drobné odchylky viditelné v charakteristice zotaveného napětí (Obrázek 5.3) oproti charakteristice z naměřených dat při reálné poruše typu zkrat, lze tento model AVR a governoru, včetně nastavení jejich parametrů, použít pro další modelování a analýzu přechodných dějů této sítě uvedené v další kapitole. Lze očekávat velmi podobné tvary charakteristik i delší časové ustálení nově nalezených hodnot.

Jak již bylo zmíněno v kap. 5.1.2, tyto odchylky mohly být způsobeny nastavením některých typových parametrů modelu buzení (zejména části týkající se budiče). Aby model sítě v Digsilentu lépe reflektoval skutečné chování analyzované sítě, je zapotřebí přesných vstupních dat regulátorů. Bez těchto dat není možné dosáhnout dokonalých výsledků.

6. Simulace dalších přechodných dějů

V této kapitole budou simulovány 3 další typy přechodných dějů ve stejné modelované síti s mírnými úpravami.

6.1 Náhlé odpojení generátoru

Počáteční podmínky:

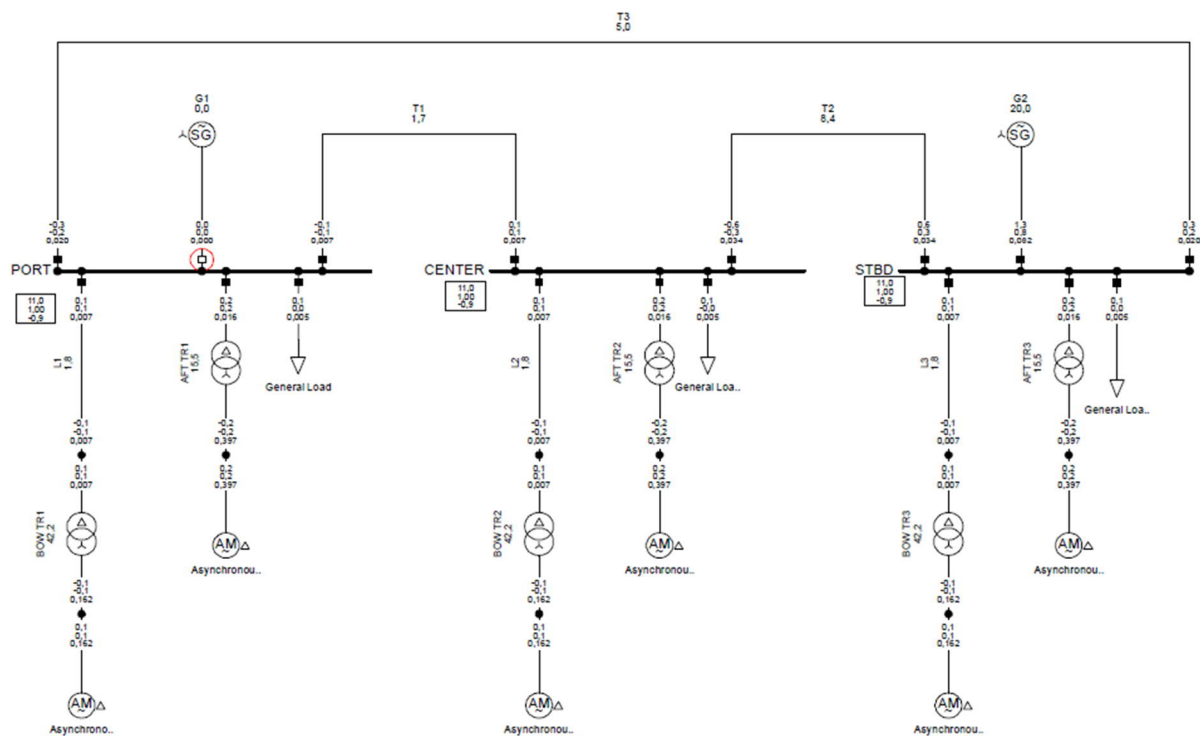
- Oba generátory byly zatíženy rovnoměrně (10 % plného zatížení).
- Celkový výkon zátěže $P=1,05$ MW, $Q=0,77$ Mvar.
- Topologie sítě – okružní.

Scénář simulace

- 1) Otevření jističe pro generátor G1 v čase 10 s.

Stav sítě po proběhnutí simulace

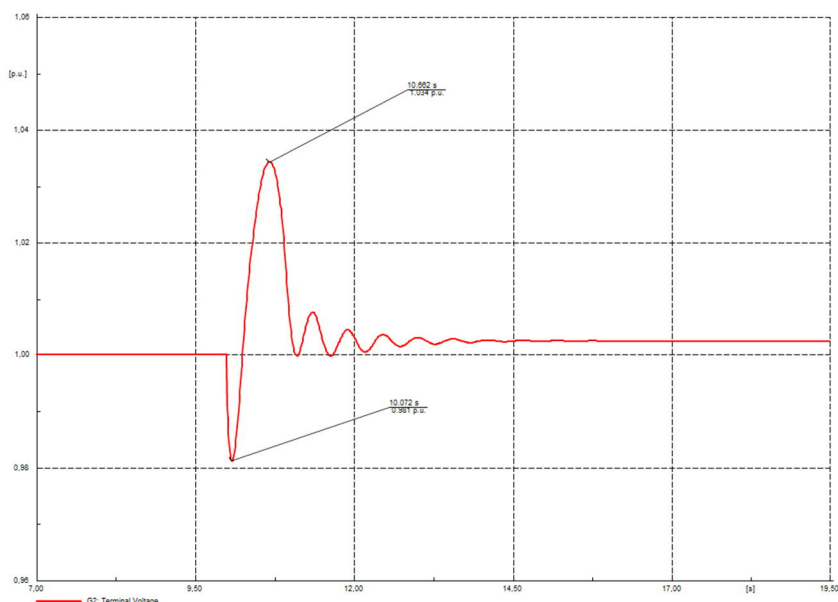
- Odpojení generátoru ze sítě.



Obrázek 6.1 Stav sítě po odpojení generátoru.

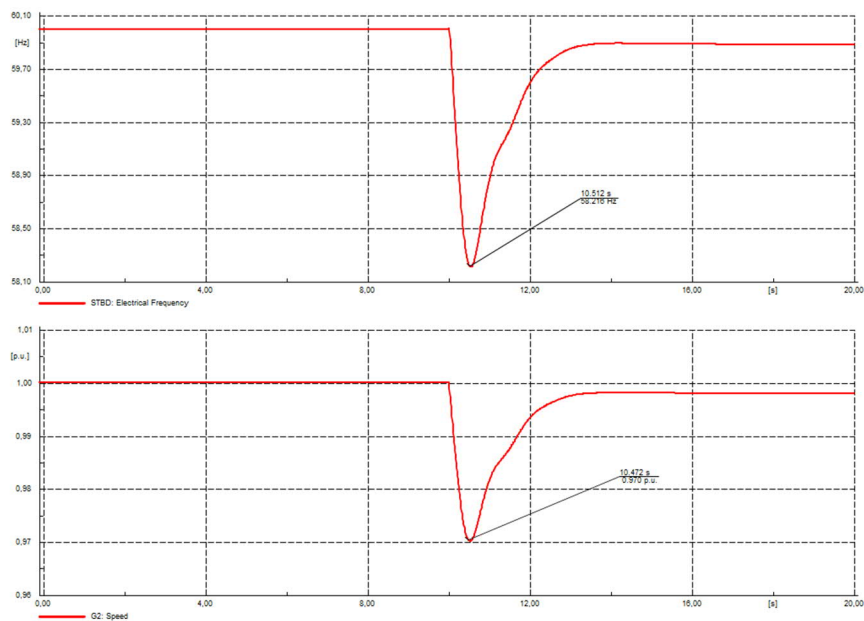
Výsledky simulace

Tato simulace je velmi podobná se simulací pro ověření nastavení regulátoru, rozdílem je chybějící zkratový účinek. Přechodný děj nastal ve stejný čas 10 s. Čas pro nalezení nových podmínek v síti je přibližně 3,722 s od vzniku.



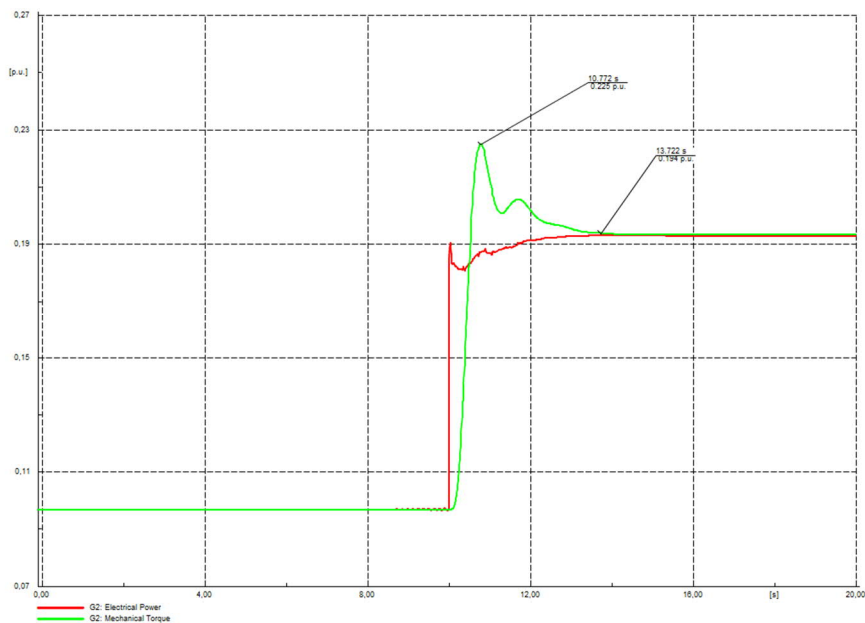
Obrázek 6.2 Průběh napětí generátoru G2 po odpojení generátoru G1.

Napětí generátoru G2 po obdržení činného rázu výkonu začalo mírně oscilovat. Pro minimum v čase 72 ms od vzniku přechodného děje je hodnota napětí 0,981 p.u., maximum v čase 662 ms dosahuje hodnoty 1,034 pu. Tyto odchylky jsou výrazně menší než při zkratu. Maximum (vyznačený bod) je reakcí působení regulátoru buzení a opět kopíruje charakteristiku skokové odezvy.



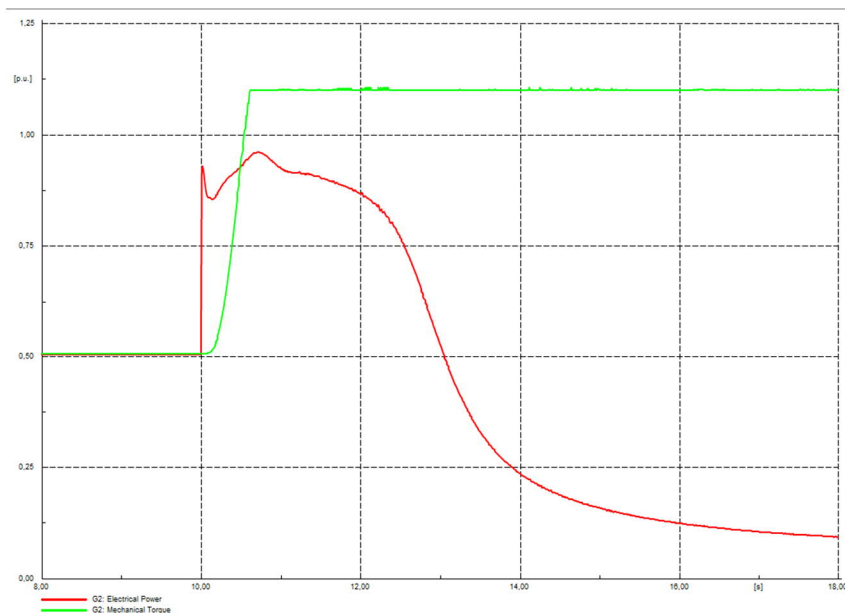
Obrázek 6.3 Horní graf – průběh frekvence, spodní graf – průběh otáček generátoru G2

Frekvence stejně jako v předchozím případě reaguje na pokles napětí. V tomto případě frekvence klesla o 2,218 Hz. Reakcí na pokles frekvence je pokles otáček o hodnotu 0,03 p.u. Reakci regulátoru pohonu lze pozorovat na grafu níže.



Obrázek 6.4 Červená křivka – výkon generátoru, zelená křivka – mechanický moment turbíny

Na propad otáček reaguje regulátor turbíny zvýšením mechanického výkonu a dorovnáním opět na stabilní hodnotu. Tento přechodný děj lze opět považovat za stabilní. Vzhledem k tomu, že generátory byly oba zatíženy rovnoměrně a pouze na 10 %, velikost činného rázu (0,5 MW) nebyla pro 8 MVA generátor problém. Pokud by oba generátory byly zatíženy na 45,6 %, velikost činného rázu (3,5 MW) již způsobí nestabilní přechod, protože nové zatížení dosahuje téměř maximálního výkonu generátoru – viz obrázek níže.



Obrázek 6.5 Nestabilní přechod po odpojení generátoru

6.2 Náhlé zvýšení a snížení zátěže

Počáteční podmínky:

- Oba generátory byly zatíženy rovnoměrně:
 - o 17,2 % plného zatížení pro případ připojení zátěže.
 - o 20,3 % plného zatížení pro případ odpojení zátěže.
- Celkový výkon zátěže $P=2,55$ MW, $Q=0,77$ Mvar při připojení zátěže.
- Celkový výkon zátěže $P=3,05$ MW, $Q=0,77$ Mvar při odpojení zátěže.
- Topologie sítě – okružní.

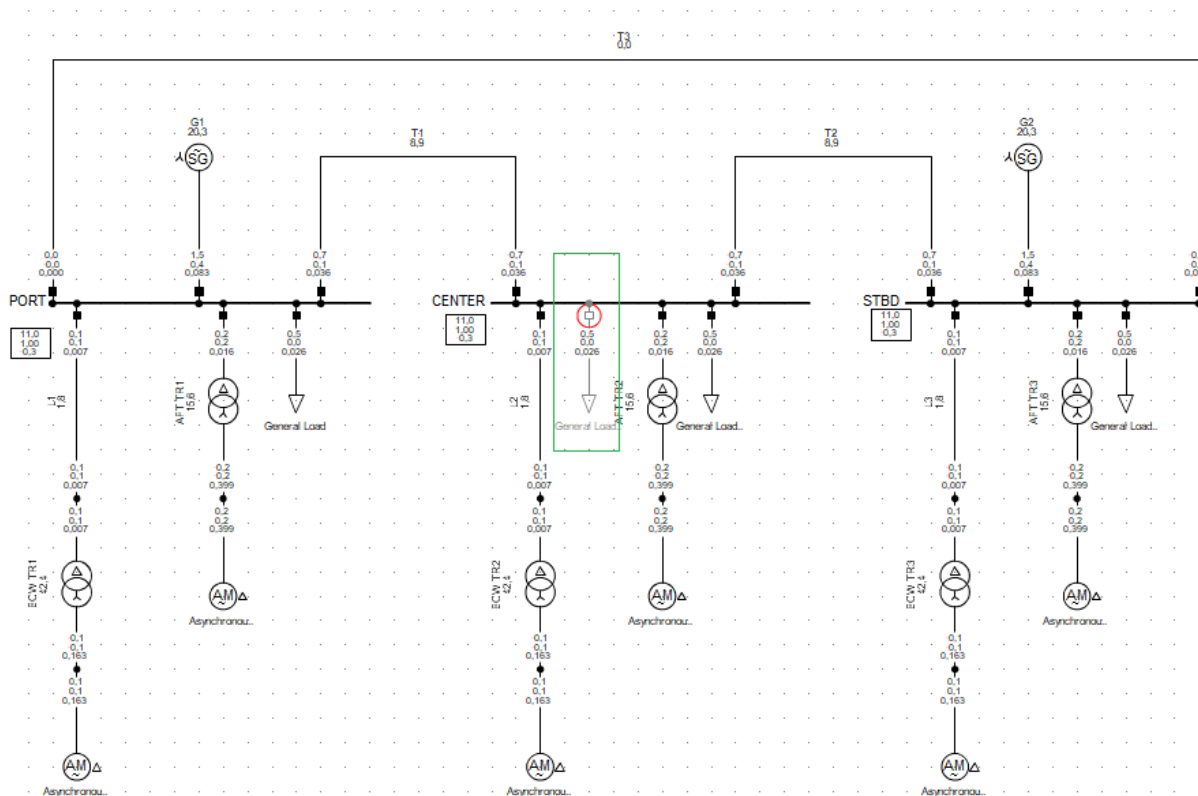
Scénář simulace

Tento scénář bude zopakován dvakrát, nejdříve pro připojení, poté pro odpojení zátěže.

- 1) Připojení/Odpojení nové zátěže o výkonu 0,5 MW v čase 10 s na rozvodnu CENTER.

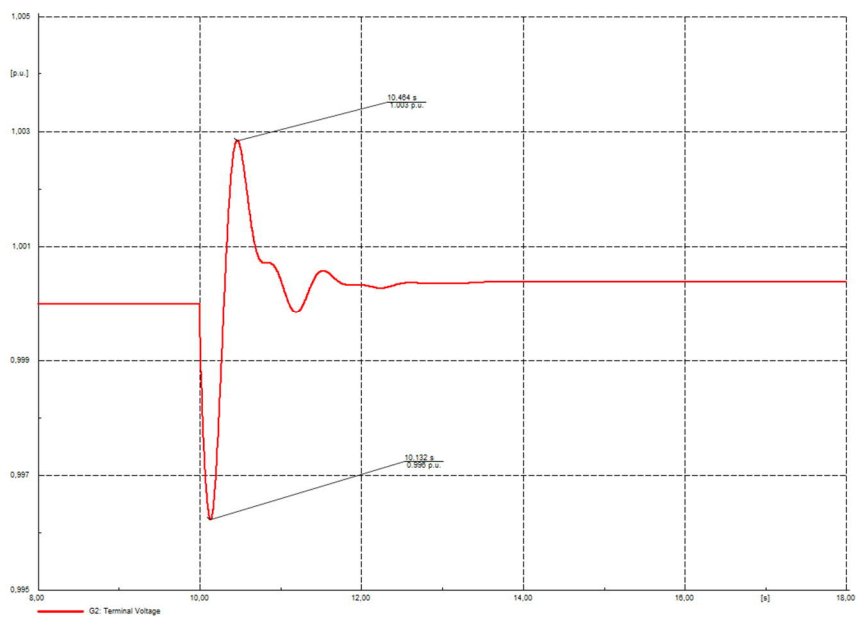
Stav sítě

Oba generátory pracují paralelně do stejné sítě, z tohoto důvodu bude pro zkoumání průběhu posuzován jen jeden generátor, a to generátor G2.

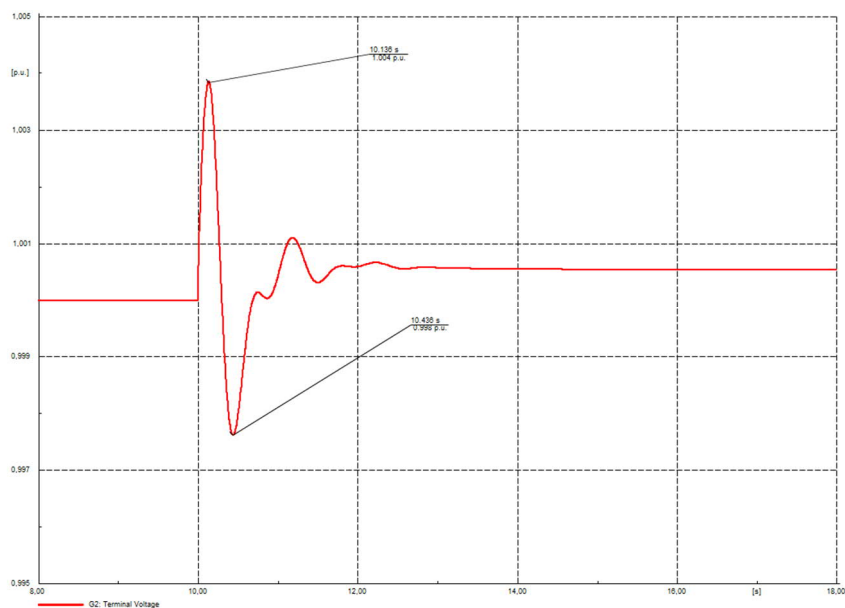


Obrázek 6.6 Stav sítě

Napětí



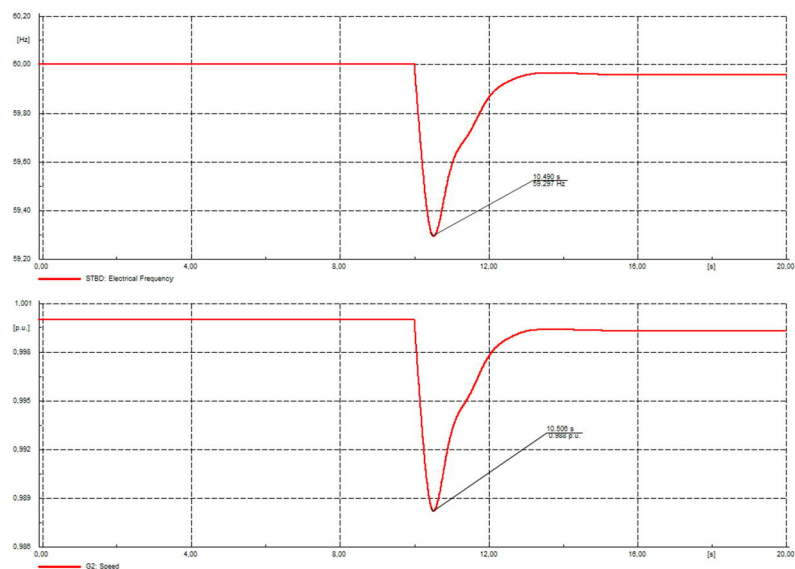
Obrázek 6.7 Průběh napětí na generátoru G2 při náhlém zvýšení zátěže



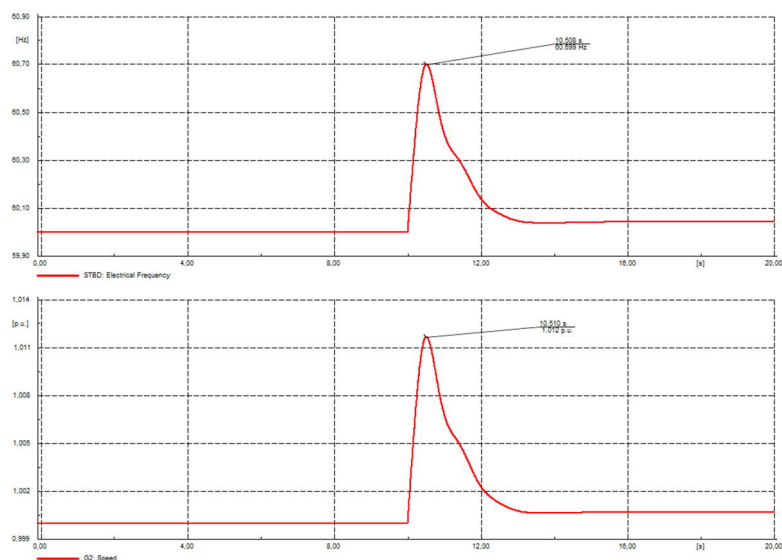
Obrázek 6.8 Průběh napětí na generátoru G2 při náhlém snížení zátěže

Obrázek 6.7 reflektuje potvrzené chování napětí při zvýšení zátěže (ráz činného výkonu), opět dochází nejdříve k poklesu (čas prvního minima 132 ms, hodnota 0,996 p.u.), poté zapůsobení regulátoru buzení a nalezení nové ustálené hodnoty. Při snížení zátěže dojde k opačnému efektu, nejdříve dojde k nárůstu napětí (čas prvního maxima 136 ms, hodnota 1,004 p.u.) a zapůsobení regulace. Oba přechodné děje vykazují stejný čas ustálení na novou hodnotu za 3 s.

Frekvence a rychlost otáček



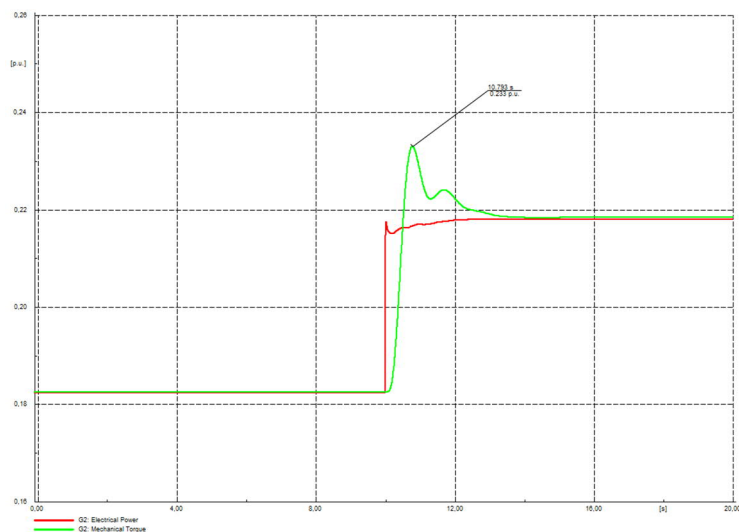
Obrázek 6.9 Zvýšení zátěže; horní graf – průběh frekvence, spodní graf – průběh otáček generátoru



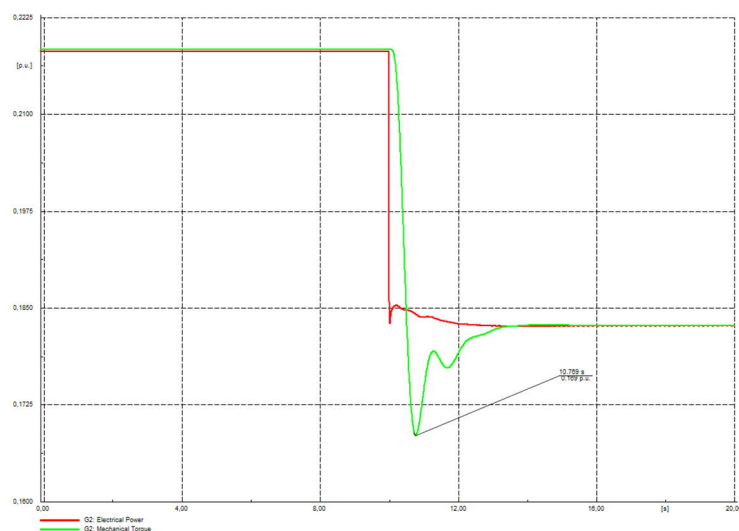
Obrázek 6.10 Snížení zátěže; horní graf – průběh frekvence, spodní graf – průběh otáček generátoru

Horní graf reflektuje potvrzené chování frekvence při zvýšení zátěže (ráz činného výkonu), opět dochází nejdříve k poklesu (čas prvního minima 506 ms, odchylka od jmenovité frekvence 0,703 Hz). Při snížení zátěže vzrůstá napětí a frekvence vzrůstá na hodnotu 60,699 Hz a dále kopíruje křivku rychlosti otáček generátoru. Otáčky v případě zvýšení zátěže klesly na hodnotu 0,988 p.u v čase 506 ms. Při snížení zátěže vzrostly na hodnotu 1,012 p.u.

Výkon a mechanický moment



Obrázek 6.11 Zvýšení zátěže; červená křivka – výkon generátoru, zelená křivka – mechanický moment turbíny



Obrázek 6.12 Snížení zátěže; červená křivka – výkon generátoru, zelená křivka – mechanický moment turbíny

Na obou grafech lze opět vidět již potvrzené chování. Při zvýšení zátěže mechanický moment skokově vzroste se zpožděním způsobené reakcí regulátoru pohonu a nastává překmit v čase 793 ms od vzniku přechodného děje. Při snížení zátěže vzniká opačný efekt, a to k maximálnímu poklesu mechanického výkonu v čase 769 ms.

Ve všech výše uvedených simulacích v této kapitole lze opět pozorovat vliv nastavení parametrů modelu AVR na průběhy napětí (delší časové ustálení, tvar charakteristik a rychlost reakce regulátorů), jako při simulaci třífázového zkratu. Model pohonu také reflektuje své nastavení a reaguje na pokles/zvýšení napětí snížením/zvýšením otáček, což má za následek pokles/zvýšení frekvence s časovým zpožděním.

Závěr

Cílem této práce bylo s využitím programu Digsilent Power Factory 2018 namodelovat 11 kV distribuční síť vrtné lodě, simulovat a analyzovat vybrané přechodné děje, ověřit správné nastavení parametrů regulátoru buzení AVR a regulátoru primárního pohonu synchronního stroje a seznámit se s problematikou dynamické stability. V úvodu práce byly popsány teoretické podklady pro vypracování.

Stěžejním bodem pro splnění všech cílů práce bylo vytvořit model vn 11 kV sítě a správně nastavit model AVR a model pohonu. Pro tyto regulátory byly na základě doporučení pro analyzované generátory zvoleny vhodné dynamické modely, a to model regulátoru buzení AC7B a model diesel pohonu DEGOV1. Dalším krokem byl výpočet a nastavení jejich parametrů. Poskytnutá vstupní data analyzovaných generátorů pro výpočet parametrů těchto regulátorů nebyla kompletní, a tudíž zde byly v některých částech regulátorů použity typové hodnoty. Tyto parametry způsobily mírnou odchylku od skutečného chování regulátorů, kterou lze vypočítat na testu skokové odezvy i následné simulaci třífázového zkratu použité pro porovnání se skutečnými naměřenými daty analyzované sítě. Tato odchylka je zřejmá zejména z průběhu budícího proudu (velmi ostré hrany překmitů) a průběhu napětí, kdy regulátor buzení vykazuje delší čas ustálení. Z výše uvedených důvodů vyplývá, že pro ideální nastavení modelů regulátorů je potřeba konzistentních vstupních dat a informací o skutečných použitých zařízeních analyzované sítě.

Celkem byly ve vn síti simulovány 4 přechodné děje. Prvním simulovaným přechodným dějem, pro ověření nastavení parametrů a typů modelů regulátorů, byl třífázový zkrat na jednom z rozvaděčů. Lodní vrtné distribuční sítě jsou koncipovány tak, aby v případě takto závažné poruchy byla odizolována postižená sekce. Před vznikem této poruchy byly v síti připojeny dva rovnoměrně zatížené generátory. Zkrat byl umístěn na rozvaděči, kde byl jeden z těchto generátorů připojen. Následkem bylo tedy odizolování celé sekce a náhlá ztráta jednoho z generátorů. Druhý generátor, připojený na nepostiženou sekci, se musel vyjma vzniklého přechodného děje vyrovnat i s rázem činného výkonu. Výsledkem pro tento generátor byl stabilní přechod, kdy došlo k nalezení nových podmínek. Bylo dokázáno, že při daném nastavení sítě, měl generátor dostatečně velkou brzdicí plochu, a tudíž nedošlo ke ztrátě stability. Z frekvenčního hlediska nastalo nalezení nové frekvence s minimální zápornou odchylkou od jmenovité hodnoty. Tato odchylka je způsobena nastavením modelu regulátoru pohonu, kdy frekvence v takto měkké síti reaguje na propad napětí a následně kopíruje chování otáček generátoru s následným ustálením na novou hodnotu.

Dále byla ve stejném modelu vn sítě simulována pouze ztráta jednoho ze dvou generátorů. Při zatížení obou generátorů na 10 %, tudíž vzniklý ráz činného výkonu nebyl tak velký (stejný jako v předchozí simulaci) a došlo opět k nalezení nových podmínek. Při zvětšení zatížení obou generátorů na 45,6 % a následným odpojením jednoho z nich, lze pozorovat nestabilní přechod. Důvodem je zejména velikost absorbovaného výkonu, kdy se nové požadované zatížení generátoru blíží maximálnímu výkonu, který je generátor schopen dodat. Další dva případy simulace pro skokové zvýšení a snížení zátěže pouze potvrzují poznatky získané z prvních dvou simulací.

Tato práce je navázáním na mou bakalářskou práci, kde byla studována statická stabilita ostrovního režimu.

Literatura

- [1] Kolektiv Autorů, *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*, Praha: Asociace Energetických manažerů. 2013.
- [2] Ing. Jan Veleba, Ph.D., doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D., „Výpočty chodu sítě,“ [Online]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~nohac/MS/MS-Pr-04.pdf>.
- [3] Rozsypal, Bc. Daniel, „Diplomová práce - Vliv zařízení FACTS na ztráty v elektrizačních soustavách,“ [Online]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61148/F3-DP-2015-Rozsypal-Daniel-DP%20Daniel_Rozsypal.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [4] Kocman, Ing. Stanislav., „Synchronní stroje,“ [Online]. Dostupné z: http://fe1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/sylab_synchronni%20stroje_bc%20FS.pdf.
- [5] PVES, Učební texty předmětu, „Prokluz pólů a statická stabilita synchronního generátoru,“ [Online]. Dostupné z: http://fe1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/pves/BuzeniSG.pdf.
- [6] Standard, IEEE, 421.5TM, „*IEEE Recommended Practice for Excitation Systems Models for Power System Stability Studies*,“ 2016.
- [7] Seadrill Ship Model, [Online]. Dostupné z: <https://www.turbosquid.com/3d-models/3d-model-seadrill-drill-ship-vessels-1473077>.
- [8] ABB, „Manuál Rozvaděče Unigear ZS1,“ [Online]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/0d7a8430a68945f4c1257de0004f8b19/Catalogue%20UG%20ZS1_RevF_2013_12_cz.pdf?xign=hdjgkI8VAk2S3sF4ysCOjUMgQkihtG37jODwJ9cTgUGZrG/a0zTHBlluDkDMLrV.
- [9] Lukáš, Ing. Bernard, „Ochrany vedení v sítích IT,“ [Online]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36857.pdf>.
- [10] ABB, „*Earth Fault Analysis Seadrill Drillship*.“
- [11] ABB, „*Selectivity Study*.“
- [12] Kolektiv Autorů. *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2011. IBSN 978-80-01-04940-2.
- [13] GmbH, DIgSILENT. *User Manual* . Gomarigen, Germany : DIgSILENT GmbH, 2017.
- [14] Standard, IEC 61363-1, „*Electrical Installations of ships and mobile and fixed offshore units*,“ 1998.
- [15] ABB, „*Marine Single AVR System*.“
- [16] ABB, „*Unitrol IEEE model*.“

Seznam příloh

Příloha A:	<i>Jednopolové schéma analyzované sítě 11 kV</i>	I
------------	--	---

